

考虑混合储能电-氢系统日前-日内协同优化调度

王瑞琪^{1,2}, 刘继彦¹, 鞠文杰¹, 王为帅¹, 许文泽³, 张祯滨^{3*}

(1. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 2. 国网山东综合能源服务有限公司, 山东 济南 250001; 3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:为了响应“双碳”目标,应对大规模可再生能源接入带来的弃风光问题,提出一种考虑混合储能的电-氢系统(electric-hydrogen system, EHS)日前-日内协同优化调度策略。考虑系统及各出力单元的约束条件,以EHS运行成本最低及碳排放最小建立目标函数;对模型中的非线性约束进行线性化处理,构建混合整数线性规划问题;介绍日前-日内协同的多时间尺度优化调度方法;采用IEEE-33节点系统对所提策略进行算例分析,验证其对促进新能源消纳及EHS低碳经济运行的有效性。仿真结果表明,所提优化调度策略能够有效提高系统可再生能源的消纳能力,减少系统碳排放及运行成本。

关键词:混合储能;电-氢系统;日前-日内;经济调度;低碳运行

中图分类号:TM73 **文献标志码:**A

引用格式:王瑞琪,刘继彦,鞠文杰,等. 考虑混合储能的电-氢系统日前-日内协同优化调度[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(2):28-36.

WANG Ruiqi, LIU Jiyan, JU Wenjie, et al. Coordinated optimal scheduling of electric-hydrogen system considering hybrid energy storage in the day-ahead and intra-day stages[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):28-36.

Coordinated optimal scheduling of electric-hydrogen system considering hybrid energy storage in the day-ahead and intra-day stages

WANG Ruiqi^{1,2}, LIU Jiyan¹, JU Wenjie¹, WANG Weishuai¹, XU Wenzhe³, ZHANG Zhenbin^{3*}

(1. State Grid Shandong Power Supply Company, Jinan 250001, Shandong, China; 2. State Grid Shandong Integrated Energy Services Co., LTD., Jinan 250001, Shandong, China; 3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: To respond to the goal of "dual carbon" and deal with the abandonment of wind power and photovoltaic caused by the access of large-scale renewable energy, a coordinated optimal scheduling of an electric-hydrogen system (EHS) considering hybrid energy storage in the day-ahead and intra-day stages was proposed. By considering the constraints of the system and each equipment, the objective function was established to minimize the operating cost and carbon emissions of the EHS. The nonlinear constraints in the model were linearized, and the model of multi-time scale scheduling method was established. The IEEE-33 node system was used to analyze the proposed strategy and verify its effectiveness in promoting the accommodation of renewable energy and the low-carbon economic operation of the EHS. The simulation results showed that the proposed strategy could effectively improve the system's accommodation capacity of renewable energy and reduce EHS's carbon emission and operating costs.

Keywords: hybrid energy storage; electric-hydrogen system; day-ahead and intra-day; economic dispatch; low-carbon operation

0 引言

随着我国碳达峰碳中和目标的提出,电力系统

正朝着清洁、安全、灵活、高效的方向转变,风、光等可再生能源的渗透率不断提高。2022年,全国风电、光伏发电新增装机达1.25亿kW,全年可再生能源新增装机1.52亿kW,占全国新增发电装机的

收稿日期:2024-02-29

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技资助项目(5100-202116567A-0-5-SF)

第一作者简介:王瑞琪(1986—),男,山东临沂人,高级工程师,博士,主要研究方向为综合能源和新型储能技术。

E-mail:13698622826@163.com

*通信作者简介:张祯滨(1984—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为预测控制在多能源系统与新能源电力变流器集群中的应用等。E-mail:zbz@sdu.edu.cn

76.2%,已成为我国电力新增装机的主体^[1]。可再生能源出力具有随机性、间歇性的特点,导致严重的弃风、弃光问题。因此,提升可再生能源消纳能力、降低系统碳排放水平对电力系统的转型具有重要的现实意义。

电力系统的低碳规划运行主要受低碳政策、低碳技术和低碳市场等多方面因素影响。文献[2]研究碳排放权分配对电源规划的影响,提出基于区域比较的碳排放权分配机制;文献[3]将碳排放流理论和需求响应引入综合能源系统优化调度中,建立双层调度模型;文献[4-5]将碳捕集系统加入综合能源优化模型中,降低碳封存成本和电转气成本。目前,国内外学者对系统碳排放进行广泛研究,但尚未形成统一的碳排放模型,通常依据不同的场景采用不同的碳排放计算方法。

氢作为一种清洁、环保的二次能源载体,在电力系统低碳运行中具有十分重要的作用。随着电解制氢及氢燃料电池技术的发展,基于各类电制氢技术可将间歇新能源发电量转化为易于规模化储存的氢能,助力实现“双碳”目标^[6-7]。文献[8-9]指出,合理规划含氢储能的混合储能微电网容量配置对改善新能源发电质量和减少弃风、弃光等方面具有重要意义。上述关于电-氢系统(electric-hydrogen system, EHS)的研究均基于日前新能源及负荷的预测数据,没有考虑新能源不确定性及负荷不确定性的影响。

移动储能(mobile energy system, MES)具有在节点之间灵活移动的特性,合理优化调度移动储能可有效降低新能源出力波动给电网造成的负面影响。文献[10-11]在移动储能车运行策略的基础上,对移动储能车的数量与额定容量优化展开研究;文献[12]提出考虑电动汽车移动储能特性的能源调度模型,有效降低微电网运行成本。

上述对于EHS的研究仅为日前预测调度,并未考虑新能源出力不确定性对调度计划制定与实施的困扰。对此,有学者通过研究多时间尺度协调逐级修正调度计划,提高可再生能源的接入能力^[13]。文献[14]基于热网互联结构,综合考虑需求响应资源,提出一种多时间尺度的优化调度方法;文献[15]研究由多个微电网组成的虚拟电厂内部协同问题,提出一种多时间尺度协同优化框架。多时间尺度协同优化调度方法能依据更短时间尺度的预测数据修正日前调度计划,在EHS优化调度问题中有广泛的应用前景。

综上所述,在面向EHS优化调度的研究中,少

有文献考虑引入固定储能与移动储能相结合的混合储能系统以提高EHS的灵活性,相关研究也仅停留在日前调度的范畴。对此,本研究计及新能源及负荷不确定性对调度策略的影响,提出一种考虑混合储能的EHS日前-日内协同优化调度策略,为响应低碳目标,引入碳排放约束及目标函数,以更准确地制定调度计划,更大限度消纳新能源。对EHS内部设备及系统约束建模;基于上述模型提出优化目标,对所提模型进行线性化处理,得到混合线性整数优化问题;基于上述优化问题引入日前-日内协同的多时间尺度优化调度方法;应用算例对所提调度优化策略进行分析验证,分析日前-日内协同优化调度方法的效果。

1 约束条件

本研究考虑风、光新能源发电,移动储能,固定储能,电解制氢设备,储氢设备及燃料电池等设备,EHS能流关系如图1所示,其中氢能全部由电解槽制取,电能由新能源发电及上级电网的火电厂提供。

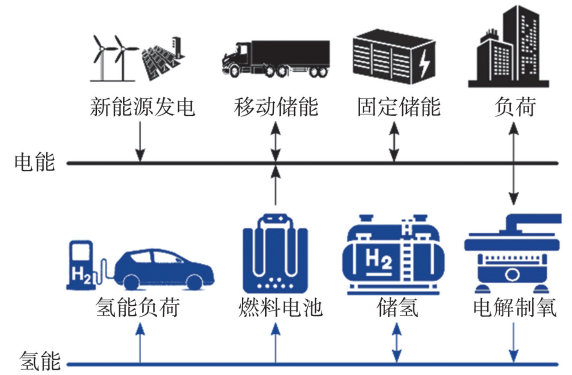


图1 EHS能流

Fig.1 Energy flow of EHS

1.1 电网功率及电压约束

电网功率平衡及电压幅值的约束条件为

$$Q_{in,j,s,t} = Q_{grid,j,s,t} + Q_{wind,j,s,t} + Q_{pv,j,s,t} - Q_{1,j,s,t} + Q_{ses,j,s,t}^{dis} + Q_{mes,j,s,t}^{dis} \quad (1)$$

$$P_{in,j,s,t} = P_{grid,j,s,t} + P_{wind,j,s,t} + P_{pv,j,s,t} - P_{1,j,s,t} - P_{el,j,s,t} + P_{fc,j,s,t} + P_{ses,j,s,t}^{dis} + P_{mes,j,s,t}^{dis} - P_{ses,j,s,t}^{ch} - P_{mes,j,s,t}^{ch} \quad (2)$$

$$U_{j,s,t}^2 - U_{k,s,t}^2 = 2(R_{jk}P_{jk,s,t} + X_{jk}Q_{jk,s,t}) \quad (3)$$

$$U_{min}^2 \leq U_{j,s,t}^2 \leq U_{max}^2 \quad (4)$$

$$P_{jk,s,t}^2 + Q_{jk,s,t}^2 \leq \bar{S}_{jk}^2 \quad (5)$$

式中:下标 j, k 为节点位置, $\forall j \in J, \forall k \in J_i$,其中 J 为节点集合, J_i 为与节点 j 相连接的节点集合;下标 s 为典型日, $\forall s \in S$,其中 S 为典型日构成的集合;

下标 t 为时间, $\forall t \in T$, 其中 T 为时间尺度; $P_{in,j,s,t}$ 、 $Q_{in,j,s,t}$ 分别为节点有功、无功注入功率; $P_{grid,j,s,t}$ 、 $P_{wind,j,s,t}$ 、 $P_{pv,j,s,t}$ 、 $P_{ses,j,s,t}^{dis}$ 、 $P_{ses,j,s,t}^{ch}$ 、 $P_{mes,j,s,t}^{dis}$ 、 $P_{mes,j,s,t}^{ch}$ 、 $P_{el,j,s,t}$ 、 $P_{fc,j,s,t}$ 、 $P_{l,j,s,t}$ 分别为上级电网输入有功功率、风力发电有功功率、光伏发电有功功率、固定储能放电有功功率、固定储能充电有功功率、移动储能放电有功功率、移动储能充电有功功率、电解制氢有功功率、燃料电池有功功率、负荷有功功率; $Q_{grid,j,s,t}$ 、 $Q_{wind,j,s,t}$ 、 $Q_{pv,j,s,t}$ 、 $Q_{l,j,s,t}$ 、 $Q_{ses,j,s,t}^{dis}$ 、 $Q_{ses,j,s,t}^{ch}$ 分别为从上级电网流入的无功功率、风电场发出的无功功率、光伏发出的无功功率、负荷无功功率、固定储能系统发出的无功功率、移动储能系统发出的无功功率; $U_{j,s,t}$ 和 $U_{k,s,t}$ 表示不同节点的电压; R_{jk} 、 X_{jk} 分别为传输线路电阻、传输线路电抗; U_{min} 、 U_{max} 分别为最小节点电压和最大节点电压; $P_{jk,s,t}$ 、 $Q_{jk,s,t}$ 分别为传输线路有功功率和无功功率; \bar{S}_{jk} 为最大传输线容量。

1.2 新能源出力及负荷约束

本研究考虑的新能源包括风与光伏, 新能源出力及电力负荷约束为

$$0 \leq P_{res,s,t} \leq \hat{P}_{res}, \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{res,s,t} \leq \hat{P}_{res} \tan(\arccos \theta_{res}), \quad (7)$$

$$0 \leq P_{l,s,t} \leq \hat{P}_l, \quad (8)$$

式中, \hat{P}_{res} 、 $P_{res,s,t}$ 分别为新能源预测有功功率和实际有功功率, $Q_{res,s,t}$ 为新能源发出的无功功率, θ_{res} 为新能源功率因数, \hat{P}_l 为预测负荷。

1.3 储能约束

本研究考虑固定储能及移动储能相结合的混合储能, 下面介绍这两类储能的共用约束及其各自的约束。

1.3.1 储能共用约束

固定储能和移动储能共同的约束条件为

$$D_{i,s,t}^{dis} + D_{i,s,t}^{ch} \leq 1, \quad (9)$$

$$E_i^{\min} \leq E_{i,s,t} \leq E_i^{\max}, \quad (10)$$

$$E_{i,s,t} = E_{i,s,t-1} + \eta_i^ch P_{i,s,t}^{ch} - P_{i,s,t}^{dis} / \eta_i^{dis}, \quad (11)$$

$$\sum_s \sum_t \eta_i^ch P_{i,s,t}^{ch} = \sum_s \sum_t P_{i,s,t}^{dis} / \eta_i^{dis}, \quad (12)$$

$$-P_i^{\max} \tan(\arccos \Phi) \leq Q_{i,s,t}^{dis} \leq P_i^{\max} \tan(\arccos \Phi), \quad (13)$$

式中: $D_{i,s,t}^{ch}$ 、 $D_{i,s,t}^{dis}$ 分别为储能充、放电状态, 为二进制变量, 其中下标 i 为节点序号, $\forall i \in \{ses, mes\}$, ses 、 mes 分别表示固定储能设备与移动储能设备; E_i^{\max} 、 E_i^{\min} 分别为储能荷电状态上下限; $E_{i,s,t}$ 为储能荷电状态; η_i^ch 、 η_i^{dis} 分别为充、放电效率; $P_{i,s,t}^{dis}$ 、 $P_{i,s,t}^{ch}$ 分别

为储能的输出、输入有功功率; Φ 为储能功率因数; P_i^{\max} 为储能充放电功率上限; $Q_{i,s,t}^{dis}$ 为储能的输出无功功率。

1.3.2 固定储能约束

固定储能的约束条件为

$$0 \leq P_{ses,s,t}^{dis} \leq P_{ses}^{\max} D_{ses,s,t}^{dis}, \quad (14)$$

$$0 \leq P_{ses,s,t}^{ch} \leq P_{ses}^{\max} D_{ses,s,t}^{ch}, \quad (15)$$

式中, $P_{ses,s,t}^{ch}$ 、 $P_{ses,s,t}^{dis}$ 分别为固定储能在 t 时刻的充、放电功率, $D_{ses,s,t}^{ch}$ 、 $D_{ses,s,t}^{dis}$ 分别为表示储能充放电状态的二进制变量; P_{ses}^{\max} 为固定储能最大充放电功率。

1.3.3 移动储能约束

移动储能可以在电力系统内跨节点灵活移动, 以适应可再生资源和需求随时间的变化, 为加快脱碳步伐提供一种经济的储能方式^[16]。移动储能约束条件为

$$0 \leq P_{mes,b,s,t}^{dis} \leq P_{mes}^{\max} \omega_{b,s,t} D_{mes,b,s,t}^{dis}, \quad (16)$$

$$0 \leq P_{mes,b,s,t}^{cha} \leq P_{mes}^{\max} \omega_{b,s,t} D_{mes,b,s,t}^{cha}, \quad (17)$$

式中: 下标 b 为移动储能节点位置, $\forall b \in B$, 其中 B 为移动储能节点集合; $P_{mes,b,s,t}^{cha}$ 、 $P_{mes,b,s,t}^{dis}$ 分别为移动储能的充、放电功率; P_{mes}^{\max} 为移动储能最大充放电功率; $\omega_{b,s,t}$ 为移动储能位置, $\omega_{b,s,t} \in \{0, 1\}$, 若在 t 时刻位于节点 b , $\omega_{b,s,t} = 1$, 否则, $\omega_{b,s,t} = 0$; $D_{mes,b,s,t}^{cha}$ 、 $D_{mes,b,s,t}^{dis}$ 分别为表示移动储能充放电状态的二进制变量。

移动储能在节点间移动的约束为

$$\sum_b \omega_{b,s,t} + \sum_b \sum_{b'} \gamma_{bb',s,t} \leq 1, \quad (18)$$

$$\alpha_{b,s,t} - \beta_{b,s,t} = \omega_{b,s,t} - \omega_{b,s,t-1}, \quad (19)$$

$$\sum_b (\alpha_{b,s,t} + \beta_{b,s,t}) \leq 1, \quad (20)$$

$$\sum_{b'} \gamma_{bb',s,t} \geq \beta_{b,s,t}, \quad (21)$$

$$\alpha_{b',s,t} - \theta_{b',s,t} = \sum_b (\gamma_{bb',s,t-1} - \gamma_{bb',s,t}), \quad (22)$$

$$\sum_b (\alpha_{b,s,t} + \theta_{b,s,t}) \leq 1, \quad (23)$$

式中: 下标 b' 为移动储能节点位置, $\forall b' \in B$; $\gamma_{bb',s,t}$ 为移动储能的行驶状态, $\gamma_{bb',s,t} \in \{0, 1\}$, 当其行驶在由节点 b 至节点 b' 的途中时, $\gamma_{bb',s,t} = 1$, 否则, $\gamma_{bb',s,t} = 0$; $\alpha_{b,s,t}$ 为移动储能的行驶方向, $\alpha_{b,s,t} \in \{0, 1\}$, 当其在时刻 t 朝着节点 b 方向行驶时, $\alpha_{b,s,t} = 1$, 否则, $\alpha_{b,s,t} = 0$; $\beta_{b,s,t}$ 为移动储能的驶离状态, $\beta_{b,s,t} \in \{0, 1\}$, 当储能在时刻 t 从节点 b 驶离时, $\beta_{b,s,t} = 1$, 否则, $\beta_{b,s,t} = 0$; $\theta_{b,s,t}$ 为二进制辅助变量, $\theta_{b,s,t} \in \{0, 1\}$ 。式(18)约束移动储能每个时段只能为停靠或行驶状态, 且位置唯一; 式(19)表示当变量 $\omega_{b,s,t}$ 发生变化时, $\alpha_{b,s,t}$ 与 $\beta_{b,s,t}$ 不同时为 0 或 1; 式

(20)约束移动储能不能同时驶离和驶入同一个节点;式(21)约束移动储能驶离节点与行驶状态的一致性;式(22)、(23)保证当移动储能到达节点 b 时,节点 b 的到达变量 $\alpha_{b,s,t}=1$,否则, $\alpha_{b,s,t}=0$ 。

行驶时间约束为

$$\gamma_{bb',s,t} \geq \gamma_{bb',s,t-1} - \gamma_{bb',s,t-t_{bb',s}}, \quad (24)$$

式中下标 $t_{bb',s}$ 为移动储能从节点 b 行驶到节点 b' 所需的时间。

1.4 氢能系统约束

本研究在氢能系统中考虑电解制氢、储氢和用氢的过程。

1.4.1 电解制氢设备

电解制氢设备的约束条件为

$$0 \leq P_{el,s,t} \leq P_{el}^{\max}, \quad (25)$$

$$H_{el,s,t} = \eta_{el} P_{el,s,t}, \quad (26)$$

式中, P_{el}^{\max} 为电解制氢设备的最大功率, $H_{el,s,t}$ 为电解制氢设备制氢量, η_{el} 为电解制氢设备转换效率。

1.4.2 储氢设备

储氢设备在运行过程中需要满足的约束为

$$0 \leq H_{hs,out,t} \leq H_{hs}^{\max}, \quad (27)$$

$$0 \leq H_{hs,in,t} \leq H_{hs}^{\max}, \quad (28)$$

$$E_h^{\min} \leq E_{h,s,t} \leq E_h^{\max}, \quad (29)$$

$$E_{h,s,t} = E_{h,s,t-1} + H_{hs,in,t} - H_{hs,out,t}, \quad (30)$$

$$\sum_s \sum_t E_{h,s,t} = 0, \quad (31)$$

式中, $H_{hs,in,t}$ 、 $H_{hs,out,t}$ 分别为储氢输入、输出功率, H_{hs}^{\max} 为储氢输入输出的最大流量, E_h^{\max} 、 E_h^{\min} 分别为储氢量及其上下限。式(31)约束在每个调度周期储氢设备的起始氢气量相同。

1.4.3 燃料电池

燃料电池的约束条件为

$$0 \leq P_{fc,s,t} \leq P_{fc}^{\max}, \quad (32)$$

$$P_{fc,s,t} = \eta_{fc} H_{fc,s,t}, \quad (33)$$

式中, P_{fc}^{\max} 为燃料电池的最大输出功率, $H_{fc,s,t}$ 为燃料电池用氢量, η_{fc} 为燃料电池转换效率。

1.5 碳排放约束

本研究仅考虑上级电网供电产生的碳排放,对于常规火电机组,碳排放量可以表示为发电功率的二次函数^[17],系统碳排放量 E_{CO_2} 及碳配额 E_{grid} 的计算式分别为

$$E_{CO_2} = \sum_t (a + bP_{grid,s,t} + cP_{grid,s,t}^2), \quad (34)$$

$$E_{grid} = B_{grid} M_{grid}, \quad (35)$$

$$E_{CO_2} \leq E_{grid}, \quad (36)$$

式中, a 、 b 、 c 为上级电网火电机组的碳排放计算系数, B_{grid} 为机组的碳配额计算系数, M_{grid} 为火电机组

装机容量。

2 目标函数

本研究采用日前预测调度与日内滚动调度协同的方法制定调度计划,两阶段采用不同的目标函数。

2.1 日前调度目标函数

日前调度目标函数为系统运行成本、切负荷惩罚、弃风光惩罚及碳排放成本,具体表达式为

$$\min C_1 = \sum_s \sum_t C_{e,s,t} + C_{h,s,t} + C_{shed,s,t} + C_{spill,s,t} + C_{CO_2,s,t}, \quad (37)$$

式中: $C_{e,s,t}$ 为系统电能部分运行成本, $C_{e,s,t} = c_{pr} P_{grid,s,t} + c_{ses} (P_{ses,s,t}^{dis} + P_{ses,s,t}^{ch}) + c_{mes} (P_{mes,s,t}^{dis} + P_{mes,s,t}^{ch}) + c_{trans} \sum_b \sum_{b'} \gamma_{bb',s,t}$,其中 c_{pr} 、 c_{ses} 、 c_{mes} 、 c_{trans} 分别为单位功率对应的电价、固定储能单位功率充放电成本、移动储能单位功率充放电成本、移动储能单位运输成本; $C_{h,s,t}$ 为系统氢能部分运行成本, $C_{h,s,t} = c_{el} P_{el,s,t} + c_{fc} P_{fc,s,t} + c_{hs} P_{hs,s,t}$,其中 c_{el} 、 c_{fc} 、 c_{hs} 分别为电解制氢设备单位运行成本、燃料电池单位运行成本、储氢设备单位运行成本; $C_{shed,s,t}$ 为切负荷惩罚, $C_{shed,s,t} = c_{shed,p} (\hat{P}_1 - P_{1,s,t}) + c_{shed,h} (\hat{H}_1 - H_{1,s,t})$,其中 $c_{shed,p}$ 、 $c_{shed,h}$ 分别为切电负荷、氢负荷单位功率惩罚价格, \hat{H}_1 为预测氢负荷, $H_{1,s,t}$ 为优化后的氢负荷; $C_{spill,s,t}$ 为弃风光惩罚, $C_{spill,s,t} = c_{spill} (\hat{P}_{res} - P_{res,s,t})$,其中 c_{spill} 为弃风光单位功率惩罚价格; $C_{CO_2,s,t}$ 为碳排放成本, $C_{CO_2,s,t} = c_{CO_2} E_{CO_2}$,其中 c_{CO_2} 为碳排放成本系数。

2.2 日内调度目标函数

日内调度在日前调度计划的基础上制定,因此,目标函数考虑机组出力偏差惩罚,同时以系统运行成本和碳排放最小化为目标,具体表达式为

$$\min C_2 = \sum_t C_{pel,s,t} + C_{e,s,t} + C_{h,s,t} + C_{shed,s,t} + C_{spill,s,t} + C_{CO_2,s,t}, \quad (38)$$

式中: $C_{pel,s,t}$ 为日内系统偏差惩罚, $C_{pel,s,t} = c_{pel} (P_{grid,s,t} - P'_{grid,s,t})$,其中 c_{pel} 为单位购电偏差惩罚, $P'_{grid,s,t}$ 为日内优化购电量。

3 线性化方法

由于约束中含有非线性部分[式(5)、(16)、(17)],难以求解。为了便于求解,将式(5)线性化。LinDisFlow模型是有源配电网中一种线性潮流模

型,目前已经得到广泛应用^[18],本研究采用 LinDistFlow 模型对式(5)进行线性化:

$$\pm Q_{jk,s,t} \leq \cot\left[\left(\frac{1}{2}-e\right)\frac{\pi}{4}\right] \cdot \left[P_{jk,s,t} - \cos\left(\frac{\pi}{4}e\right) \cdot \bar{S}_{jk}\right] + \sin\left(\frac{\pi}{4}e\right) \cdot \bar{S}_{jk}, \quad (39)$$

式中 e 为 1~4 的整数。

引入二进制辅助变量 $\alpha_{b,s,t}$, 对式(16)、(17)进行线性化处理:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{mes,b,s,t} \leq \alpha_{b,s,t} P_{mes}^{\max} \\ \alpha_{b,s,t} \leq \omega_{b,s,t} \\ \alpha_{b,s,t} \leq D_{mes,b,s,t} \\ \alpha_{b,s,t} \geq \omega_{b,s,t} + D_{mes,b,s,t} - 1 \end{cases} \quad (40)$$

经过线性化处理后,上述问题已经转化为易于求解器求解的混合线性整数规划问题。

4 日前-日内优化调度方法

由于风光预测出力跟时间尺度相关,单一的日前调度不能满足大规模风光并网的情况^[14],计及新能源不确定性的日前-日内调度模型可在很大程度上降低新能源不确定性对新能源消纳的影响^[19]。对此,本研究采用日前-日内优化调度方法,具体方法如图2所示。日前预测调度计划每 24 h 制定一次;日内滚动调度计划每 1 h 制定一次,每次以 4 h 为一个调度周期。

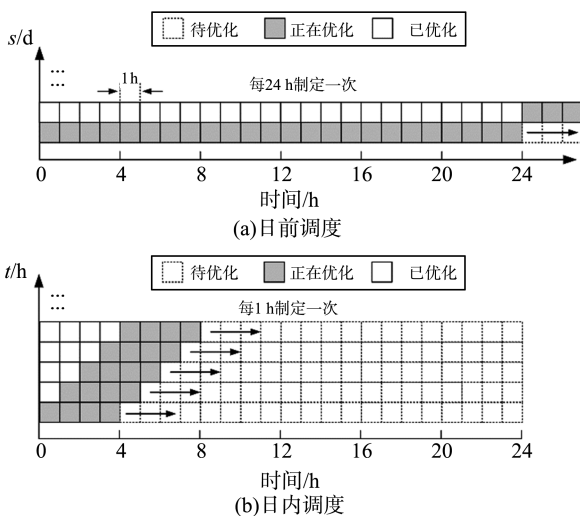


图2 日前-日内优化调度方法结构图

Fig.2 Day-ahead and intra-day optimization scheduling method structure chart

日前-日内优化调度的具体流程如图3所示,其中 t 为日内调度时间, s 为日前调度的典型日, s_0 为典型日数量,本研究 $s_0=4$ 。

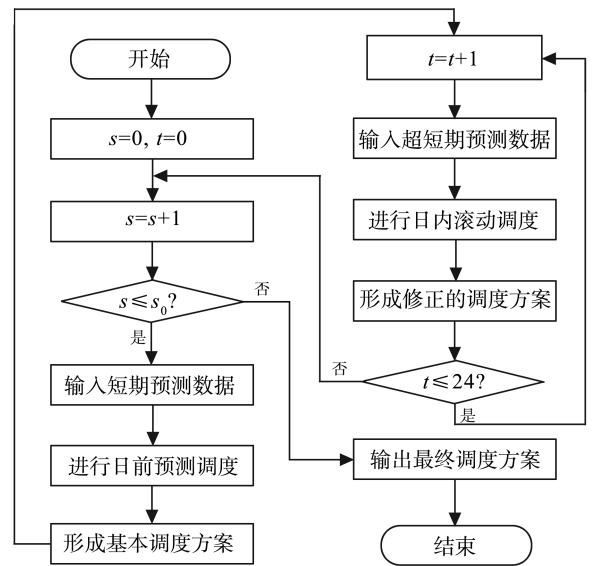


图3 日前-日内优化调度方法流程图

Fig.3 Day-ahead and intra-day scheduling method flow chart

在日前根据短期负荷预测数据制定次日机组运行计划,形成基本调度方案;在日内结合超短期预测数据滚动优化机组出力,对日前调度方案进行修正,形成更为准确、与可再生能源出力及负荷匹配度更高的调度方案。

5 算例分析

本研究将设计算例验证所提模型的优势和有效性。优化问题基于 MATLAB 2020a 平台,采用 Yalmip 建模,通过 Gurobi 求解器求解。

5.1 算例数据

本研究采用 IEEE-33 节点系统进行算例分析,如图4所示。该系统包含 1 个与上级电网相连节点、2 个风力发电站、2 个光伏发电站、5 个电氢耦合节点、1 个固定储能节点、1 台含有 5 个备选节点的移动储能车。

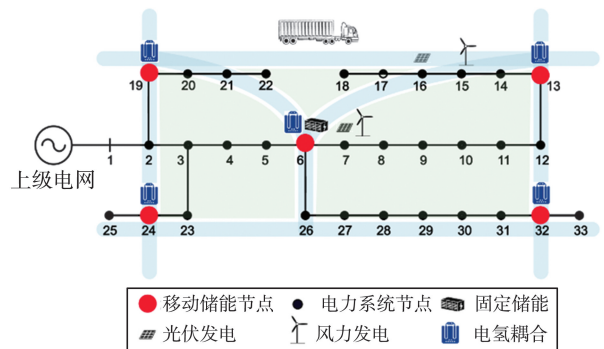


图4 IEEE-33 节点系统算例

Fig.4 Case of IEEE-33 node system

本研究采用的分时电价分为尖峰、高峰、平段和低谷 4 个时段,具体如表 1 所示。

表 1 分时电价曲线
Table 1 Time-of-use tariff curve

时段类别	具体时段	电价/元
尖峰	10:00—11:00	1.039 4
	19:00—21:00	
高峰	08:00—10:00	0.920 3
	15:00—19:00	
平段	06:00—08:00	0.622 6
	11:00—15:00 21:00—23:00	
低谷	00:00—06:00	0.324 9
	23:00—24:00	

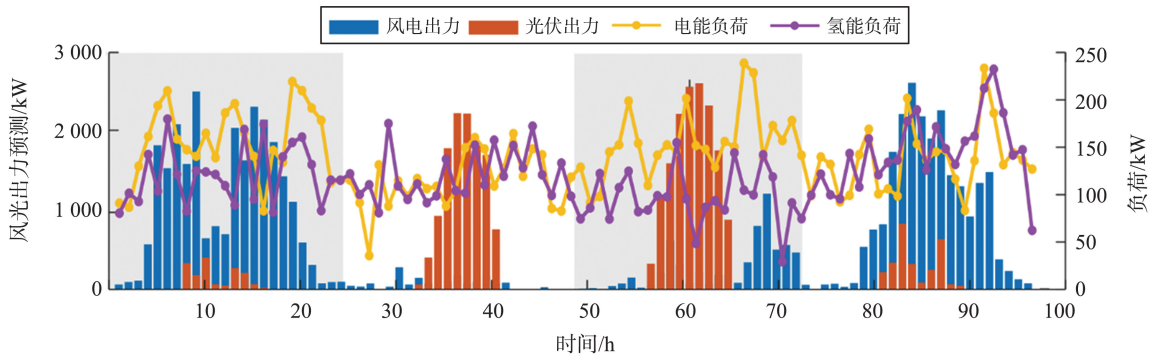


图 5 日前短期风光出力及电氢负荷预测

Fig.5 Day-ahead wind power and photovoltaic power forecast in typical days

表 2 3 种场景下的调度结果

Table 2 Scheduling results in three scenarios

场景	风光利用率/ %	碳排放量/ kg	总运行成本/ 10 ⁸ 元
1	81.60	53 664	6.758 0
2	84.38	53 322	6.300 4
3	86.26	51 903	6.226 5

从新能源消纳特性上分析,当在 EHS 中分别加入移动储能与储氢设备,系统的风光利用率分别提高 2.78 和 1.88 百分点。由图 5 可知,在每个典型日的午间时段,风光资源最为丰富,由于风光出力并不能被系统完全消纳,因此存在一定的弃风弃光现象。当系统中加入移动储能后,富余的风光电力可用于给移动储能设备充电;在系统中加入储氢设备后,富余的风光电力可被电解制氢设备转化为氢气储存起来,以供给氢能负荷或用于燃料电池发电支撑电网,促进 EHS 的可再生能源消纳,提高能源利用效率。

从碳排放角度分析,当系统不含移动储能及储氢设备时,制氢所用电力全部来自新能源发电及上级电网,系统碳排放量最高;加入移动储能后,富余的电能可以储存起来,减少购电量及系统碳排放量;当系统加入储氢设备时,储存的氢气可以在风光出力不足时使用,有效减少电解设备消耗的电力,大大减少系统碳排放量,相比场景 1,碳排放量

选用 4 d 作为典型日,单位调度时段为 1 h。选取某地风光出力及电氢负荷预测数据,其中日前预测曲线如图 5 所示。

5.2 优化结果分析

为了对比分析移动储能与储氢设备对 EHS 碳排放与运行成本的影响,对系统设置了 3 种场景:场景 1 为不含移动储能与储氢设备;场景 2 为含移动储能设备,不含储氢设备;场景 3 为含移动储能与储氢设备。根据所设置的 3 种场景优化得出的调度结果如表 2 所示。

减少 1 761 kg,有效促进 EHS 的低碳运行。

从经济性角度分析,在 EHS 中加入移动储能与储氢设备虽然增加了设备的运行成本,但移动储能和储氢设备均可作为富余风光的消纳手段,促进风光可再生能源消纳,减少弃风弃光成本。加入移动储能及储能系统可以减少碳排放量,相应也会减少系统碳排放成本,减少从上级电网购电的成本。综合来看,相比场景 1,场景 3 的系统总运行成本减少 5 315 万元,降低 7.86%。

场景 3 下 EHS 的电功率和氢气量平衡图如图 6、7 所示。在风光资源丰富的时段,主要由风光出力满足电能负荷,富余的风电与光伏还可用于给储能充电及供给电解制氢设备,将电能转换成氢能以供氢能负荷。系统的氢负荷主要由电解制氢设备及储氢设备满足,储氢设备充氢由风光资源丰富时电解制氢设备制得,在可再生能源出力不足时供给燃料电池,将氢能转换为电能支撑电网。

场景 3 下移动储能的出力及荷电状态如图 8 所示。由图 8 可知,由于移动储能具有在节点之间灵活移动的特性,可停靠在某个节点进行充放电以支撑电网的稳定。本研究共设置 5 个移动储能目标节点,移动储能车在节点间运输需要一定时间,优化后的移动储能根据最优调度结果在节点间移动,以满足节点的可再生能源消纳与负荷需求。

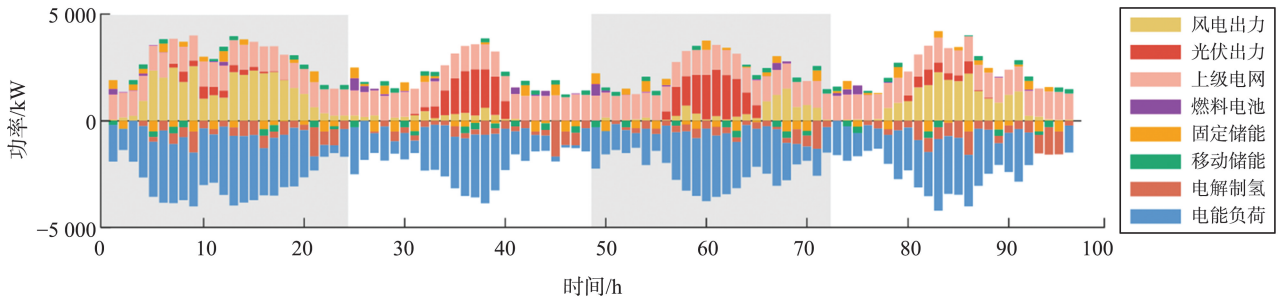


图6 EHS功率平衡图
Fig.6 Power balance of EHS

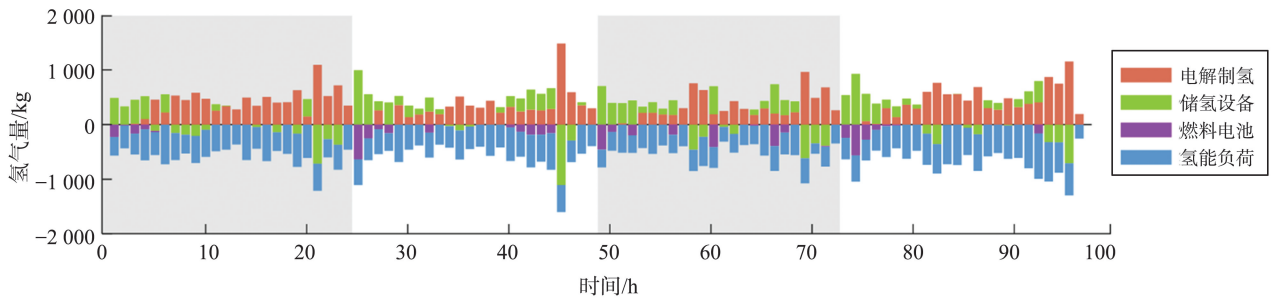


图7 EHS氢气量平衡图
Fig.7 Hydrogen balance of EHS

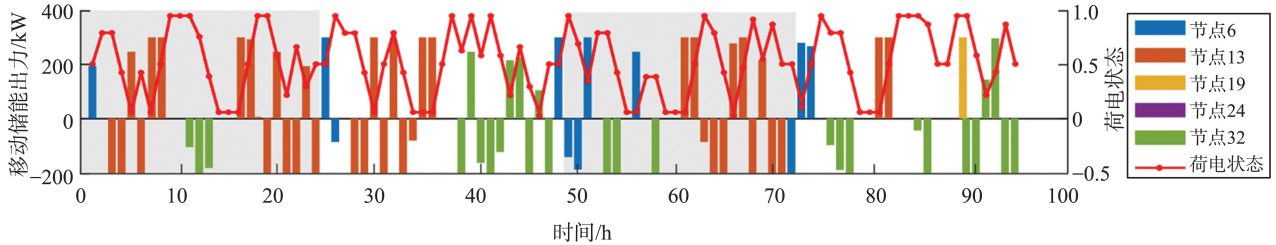


图8 移动储能出力及荷电状态
Fig.8 Output and state of charge of mobile energy storage

5.3 日前-日内协同优化调度模型效果分析

本研究采用日前预测优化与日内滚动优化相结合的多时间尺度调度方法,风光出力及负荷在日内较日前预测数据的误差如图9所示,风光出力及负荷在日内较日前调度后的实际偏差如图10所示。由图9、10可以看出,风光及负荷的实际偏差趋势与预测误差趋势大致相同,日内滚动优化根据风光预

测出力及负荷误差优化形成新的调度方案,可以尽量保证在日前调度计划不改变的情况下,平衡风光及负荷的预测误差。因此,在日前预测调度的基础上引入日内滚动优化,有利于提高系统平抑风电出力误差及负荷波动,提高系统对可再生能源的消纳能力,减少弃风光量,提高系统运行的稳定性与经济性。

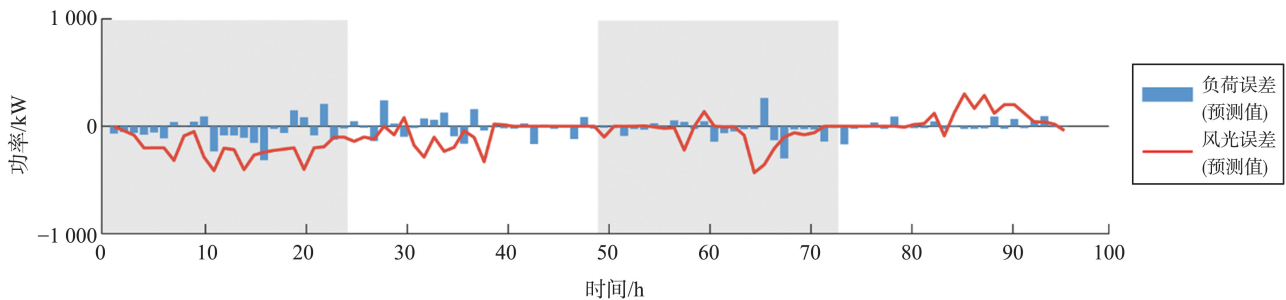


图9 风光出力及负荷预测误差
Fig.9 Forecasting error of RES output and power load

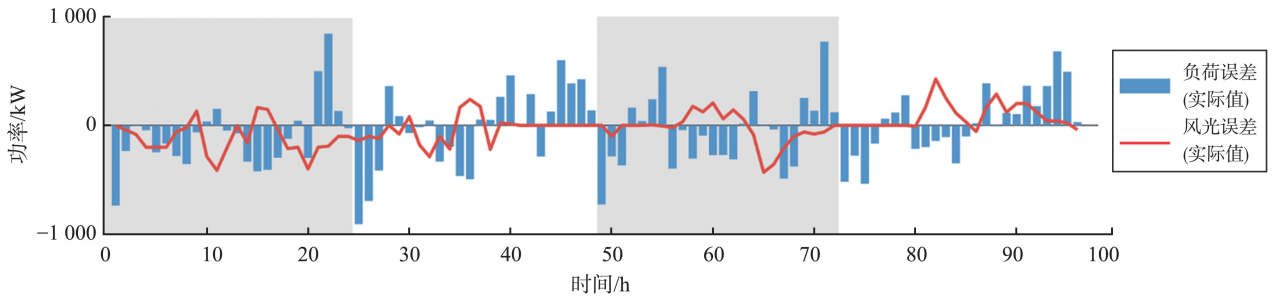


图10 风光实际出力偏差及负荷实际偏差

Fig.10 Actual output deviation of scenery and actual load deviation

6 结论

本研究提出一种考虑混合储能电-氢系统日前-日内协同优化调度策略,构建考虑混合储能的EHS低碳经济运行模型,采用日前-日内协同的多时间尺度优化调度方法,通过算例分析验证所提策略的合理性及所用方法的有效性。具体结论如下:在EHS中采用固定储能与移动储能相结合的策略,有效提高电网灵活性,提高系统可再生能源的消纳能力,减少系统碳排放及运行成本;设置碳配额与碳排放成本,有效激励系统向低碳目标优化,促进系统低碳运行;采用日前-日内协同的多时间尺度优化调度方法,有效平抑可再生能源出力误差及负荷波动,提高系统的灵活性、稳定性与经济性。

参考文献:

[1] 中国政府网. 国家能源局发布2022年可再生能源发展情况并介绍完善可再生能源绿色电力证书制度有关工作进展等情况[R/OL]. (2023-02-14) [2024-02-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/14/content_5741481.htm

[2] 宋旭东, 向铁元, 熊虎, 等. 考虑碳排放权分配的低碳电源规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 47-52. SONG Xudong, XIANG Tiejuan, XIONG Hu, et al. Low carbon generation expansion planning based on carbon emission right allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 47-52.

[3] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178. LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 169-178.

[4] 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. TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. "Source-load" low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture system [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3346-3355.

[5] 廖跃洪, 陈洁, 杨彦飞, 等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行下的含P2G和光热电站虚拟电厂优化调度[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 20-27. LIAO Yuehong, CHEN Jie, YANG Yanfei, et al. Optimal scheduling of virtual power plant with P2G and photo-thermal power plant considering the flexible operation of carbon capture power plants [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 20-27.

[6] 杨馥源, 田雪沁, 徐彤, 等. 面向碳中和电力系统转型的电氢枢纽灵活性应用[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 110-117. YANG Fuyuan, TIAN Xueqin, XU Tong, et al. Flexibility of electro-hydrogen hub for power system transformation under the goal of carbon neutrality [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 110-117.

[7] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13. PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.

[8] 王一凡, 王辉, 李旭阳, 等. 电氢混合储能微电网容量配置优化的研究综述[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(6): 18-36. WANG Yifan, WANG Hui, LI Xuyang, et al. Survey of capacity allocation of microgrid hybrid energy storage system based on hydrogen energy storage [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(6): 18-36.

[9] 李奇, 赵淑丹, 蒲雨辰, 等. 考虑电氢耦合的混合储能

- 微电网容量配置优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 486-495.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [10] 朱俊澎, 袁越, 吴涵. 考虑移动氢储能和高密度可再生能源的主动配电网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 42-48.
- ZHU Junpeng, YUAN Yue, WU Han. Optimal dispatch of active distribution network considering mobile hydrogen energy storage and high-density renewable energy sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 42-48.
- [11] 蔡博戎, 凌开元, 姜华, 等. 配电网移动储能优化配置研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(9): 26-32.
- CAI Borong, LING Kaiyuan, JIANG Hua, et al. Research on optimal allocation of movable energy storage in distribution network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 26-32.
- [12] 陈中, 刘艺, 陈轩, 等. 考虑移动储能特性的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 77-85.
- CHEN Zhong, LIU Yi, CHEN Xuan, et al. Charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles considering characteristics of mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 77-85.
- [13] 邓佳乐, 胡林献, 邵世圻, 等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3803.
- DENG Jiale, HU Linxian, SHAO Shiqi, et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3796-3803.
- [14] 李领齐, 程志江, 郭少康, 等. 基于热网互联的电热系统多时间尺度优化调度[J]. 电气传动, 2023, 53(10): 57-63.
- LI Lingqi, CHENG Zhijiang, GUO Shaokang, et al. Multi-time scales optimization scheduling of electric heating combined system based on heat network interconnection[J]. Electric Drive, 2023, 53(10): 57-63.
- [15] CHANG W G, YANG Q. Low carbon oriented collaborative energy management framework for multi-microgrid aggregated virtual power plant considering electricity trading[J]. Applied Energy, 2023, 351: 121906.
- [16] HE G, MICHALEK J, KAR S, et al. Utility-scale portable energy storage systems[J]. Joule, 2021, 5(2): 379-392.
- [17] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41-51.
- LU Zhigang, SUI Yushan, FENG Tao, et al. Wind power accommodation low-carbon economic dispatch considering heat accumulator and carbon capture devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 41-51.
- [18] PAN G S, GU W, LU Y P, et al. Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2662-2676.
- [19] 王会超, 秦昊, 周昶, 等. 计及新能源预测不确定性的跨区域日前-日内调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 60-67.
- WAHG Huichao, QIN Hao, ZHOU Chang, et al. Cross-regional day-ahead to intra-day scheduling model considering forecasting uncertainty of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 60-67.

(编辑:孙亚彤)