

电力市场环境下的电—氢一体化站优化运行

顾 玫, 王晨磊, 解 大

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:电转氢技术为解决弃风弃光问题提供了新的思路。针对氢能大规模环保供应的问题, 首先提出一种电—氢一体化站的构建思路, 在确定一体化站的削峰填谷、可再生能源消纳与氢能供应的 3 个功能的基础上, 分析一体化站参与主能源与新能源市场的购电策略; 然后以一体化站的总运行成本最小为目标函数并考虑一体化站中电—氢系统的功率平衡与约束条件建立考虑市场环境的电—氢一体化站的优化运行模型, 该模型可以运用线性规划求解; 最后, 算例结果验证了文中提出的一体化站可以有效地提高电网削峰填谷能力以及可再生能源的消纳能力。

关键词:燃料电池汽车; 电—氢一体化站; 削峰填谷; 可再生能源消纳; 电力市场

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.016 中图分类号: TM621 文章编号: 1673-9140(2022)01-0130-10

Research on optimal operation of electricity-hydrogen integrated station in electricity market environment

GU Jiu, WANG Chenlei, XIE Da

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The electricity-to-hydrogen technology provides a new idea for solving the problem of abandoning wind and light. Aiming at the issue of large-scale environmental protection of hydrogen energy, this paper proposes an idea for constructing an electricity-hydrogen integrated station. Based on the function settings of peak shaving and valley filling, renewable energy consumption and hydrogen supply, the power purchase strategies of the integrated station in the main energy and new energy markets are analyzed. Then, taking the minimum total operating cost of the integrated station as the objective function and considering the power balance and constraints of the power-hydrogen system in the integrated station, an optimal operation model of the power-hydrogen integrated station considering the market environment is established. The model can be solved by linear planning. Finally, numerical example results verify that the integrated station proposed in this paper can effectively improve the peak shaving and valley filling capacity of the power grid and the absorbing capacity of renewable energy.

Key words: fuel cell vehicle; electric-hydrogen integrated station; peak shaving and valley filling; renewable energy consumption; electricity market

随着风电、光伏发电成本不断地降低, 新能源发电已逐步进入平价上网时代, 新能源发电的装机量

在未来将逐渐扩大^[1-3]。然而可再生能源出力具有波动性和间歇性的特点, 2019 年全国弃风电量约

169亿千瓦时,平均弃风率4%;全国弃光电量约46亿千瓦时,平均弃光率2%^[4]。大量的可再生能源弃电量给经济造成巨大的损失^[5-7],提高可再生能源的消纳能力,成为当前与未来亟需解决的问题。

针对新能源接入电网的消纳问题,国内外研究人员在储能系统、多能互补以及电力市场设计等多个角度开展研究。在储能系统方面,文献[8]建立了电动汽车充电站的调度策略,以实现风电的波动抑制;文献[9]通过考虑包含电、热、气的广义储能以及可控负荷,实现对综合能源系统的优化运行;文献[10]针对风电消纳问题,提出了含风电—储能的热电联产系统的能量优化函数。针对多能互补,文献[11]构建了电力—天然气(power to gas, PTG)电转气的电—气联合网络经济调度模型。在电力市场设计研究中,文献[12]从可再生能源配额和绿证交易的角度,构建了考虑可再生能源配额的并网风电经济调度模型,分析了其对风电消纳量的影响;文献[13]设计了适应可再生能源配额制的电力市场体系,通过建立消纳量二级市场,刺激市场成员主动购买绿色电能;文献[14]构建了电力市场下构建风电—光伏—储能联合优化运行决策模型,分析了发电设备的出力安排。

随着全球氢燃料电池汽车产业的快速发展,氢气来源和制氢技术备受关注^[15]。利用风力发电、太阳能发电等的剩余电力(即调峰谷电及无法上网的富裕电力)电解水制氢,具有发电成本低、工艺路线低碳环保等优势,被认为是目前实现大规模制氢的理想途径,受到业内普遍重视^[16-17]。国内关于氢能在综合能源系统的研究也取得了一定的进展。文献[18]建立了电热氢多源储能系统,用于提升电网的调节能力;文献[19]中考虑了电转气和燃气轮机的协调工作,实现对综合能源削峰填谷和风电消纳的作用;文献[20]以风氢耦合并网系统为研究对象,分别提出系统容量配置和能源管理控制策略,以降低该系统的并网功率波动。通过以上的研究可知,氢能的应用仍处于探索阶段,主要集中在某些特定的应用场景,如风—氢新能源并网系统,以氢能—工业化耦合系统以及含氢能的综合能源利用等。

2016年10月发布的《中国氢能产业基础设施发展蓝皮书(2016)》^[21],提出了中国氢能产业的发展路线图,首次对中国中长期加氢站和燃料电池车辆发展目标提出了规划。由此可见,以燃料电池汽

车产业为导向的氢能应用场景具有极大的研究价值,但是针对燃料电池汽车产业的高效制氢和加注服务方案的研究较为不足。

基于此,本文以可再生能源大量接入的配电网为例,以大规模燃料电池汽车氢能供应为导向,首先提出一种用于高渗透率配电网下面向新能源消纳的电—氢一体化站建设方案;然后分析了一体化站在多种市场交易场景下的交易策略,并通过建立电—氢能量转换模型,提出了一种电—氢一体化站的多目标优化模型;最后通过算例仿真验证该一体化站的经济性以及配电网新能源消纳能力的提升。

1 电—氢一体化站的结构设计

1.1 电—氢一体化站组成结构

电—氢一体化站是融合电解槽制氢站、储氢站和燃料电池发电站的智能一体化站,在提供最基本的燃料电池汽车加氢服务的同时,站内的燃料电池发电系统实现了参与电网的调频辅助服务市场以及支撑配电网电压稳定等。电—氢一体化站的整体构架包括调度中心、电解水制氢站、储氢系统、燃料电池发电站及氢气加注站5个部分,如图1所示。

1)调度中心。调度中心负责电—氢一体化站的运行的稳定和安全,其主要包括处理采集系统的数据、监视站内主要设备、电—氢能量转换系统以及电网系统的运行状态。根据监控数据以及一体化站的运行策略,控制一体化站内各子系统的运行。

2)制氢系统。制氢系统是—体化站的核心模块,具有氢气制造、消纳电网中波动电能的作用。本文采用目前主流的碱式电解槽来实现制氢,碱性电解槽通过电能破坏水分子的氢氧键以获得氢气和氧气,其效率一般在75%~85%。

3)储氢站。储氢站是—体化站中氢气的储存场所,充当氢能的中转、储存的作用。由于高压氢气存储效果较好,不存在氢气蒸发现象,因此—体化站采用该方式。储氢站中氢气的去向包括向加注站传输氢气、将氢气供给站内的燃料电池发电系统。

4)燃料电池发电系统。燃料电池发电系统是—体站中另一个能源转换系统,将站内储存的氢气通过燃料电池发电供给电网,以支持电网的调频调峰任务,提高电网运行的可靠性和效率。

5)氢气压缩系统与加注站。压缩系统实现了氢

气不同气压等级的转化,压缩后的氢气可存储到高压储氢系统或者直接供给加注站。除此之外,加注站是面向用户的窗口,加注站中氢气的来源包括高

压储氢系统和制氢系统的直接产出2个方面。根据燃料电池车的车载储氢压力不同,加注机设置不同的气压等级的独立喷嘴,实现气压的二次转化。

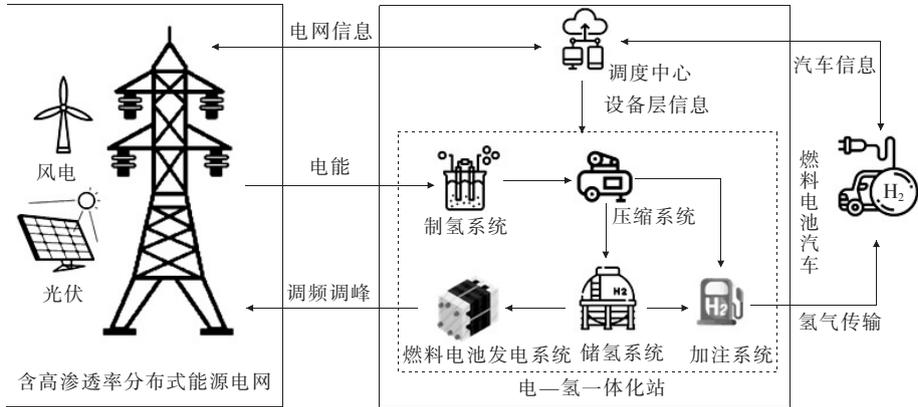


图 1 电—氢一体化站总体结构

Figure 1 Overall structure of electricity-hydrogen integrated station

1.2 一体化站的功能设计

能量转换系统可灵活控制一体站的运行状况,配合一体化站主控系统的调控,一体化站可以实现以下3个主要功能。

1)削峰填谷。一体化站根据电网的调频需求量,改变一体化站的运行状态和不同状态下能量流动的方向和大小,以达到对电网负荷削峰填谷的效果。

2)可再生能源消纳。一体站可以利用储氢站平抑电网中波动的、间歇的可再生能源发电,从而提高该区域负荷的电能质量。同时,在低负荷时对富余的风电和光伏发电进行吸收,降低可再生能源的弃风(光)率。

3)向燃料电池汽车供氢。供氢是一体化站的基础的功能,也是其核心的业务。一体化站通过电能交易以及一体化站内部的优化运行,实现大规模高效地制氢商业化模式。

2 一体化站的运行状况

2.1 一体化站参与市场的情况分析

根据一体化站的功能设计,结合电力市场的各类市场特点,分析了一体化站参与主能量市场交易以及可再生能源市场,以实现削峰填谷和可再生能源消纳2大主要的功能。一体化站参与市场的基本框架如图2所示。

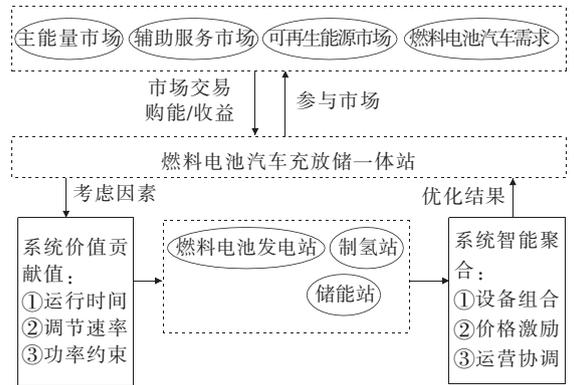


图 2 一体化站参与市场的基本框架

Figure 2 Basic framework of integrated stations that participates in the market

2.2 “主能量—调频”两级市场交易

电价是电力市场的核心,一体化站作为综合能源系统,其在主能量市场交易过程中只需关注电价的高低即可。在电价高时,一体化站将储氢站中的氢能通过燃料电池发电;在电价低时,一体站通过电解槽制氢储在储氢站中,从而起到削峰填谷的作用。由于调频市场的电价更高,且一体站通过氢发电的调频速率较快,因此一体站在调频辅助市场可获得更高的收益。通过在“主能量—调频”两级市场中差异化的电价方式,一体化站可实现运行成本的优化,在主能量市场不同电价下一体站的购电策略如图3所示。

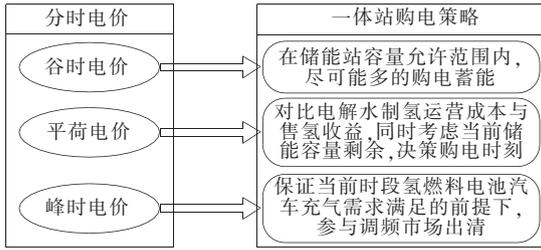


图 3 一体化站在分时电价下的购电策略

Figure 3 Power purchase strategy of integrated station under time-of-use price

2.3 可再生能源市场交易

当配电网中含有大量的可再生能源时,将对配电网中负荷的正常运行造成电能质量下降的问题。基于此,本文根据日前的一体化站同一母线上的相邻负荷的负荷上报量,对可再生能源产生的波动性电能进行消纳。可再生能源市场下一体化站与各市场主体的交互策略如图 4 所示,与一体化站接于同一母线的有该区域的其他用电负荷。

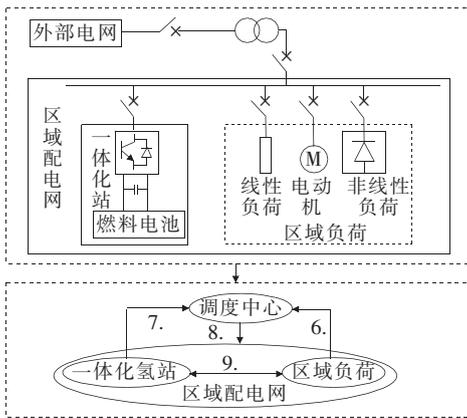


图 4 可再生能源市场下一体化站与市场主体的交互

Figure 4 Interaction between integrated stations and market entities in the renewable energy market

一体化站具体的交互流程如下。

- 1) 区域负荷上报日前负荷需求。
- 2) 一体化站上报日前站内可供调频容量,与调度中心签订消纳可再生能源合同和电能质量合同,负责该区域负荷的电能质量稳定。
- 3) 电网调度中心根据区域的频率、电压实时的波动情况,调节电—氢一体化站的运行模式以及制氢系统和燃料电池的运行功率。

4) 对于电网来说,一体化站需负责区域负荷的用电质量和电网频率、电压稳定;否则需向电网和用户缴纳罚金。在此基础上,消纳过剩的可再生能源,

从而提高系统的可再生能源的消纳能力,减少弃风弃光现象。

3 市场环境下一体化站优化运行模式模型

3.1 市场环境下一体化站优化运行模式模型

3.1.1 目标函数

电—氢一体化站的运行同时涉及到与电网和电网的双向互动,包括竞价购电、参与可再生能源市场、参与调频辅助服务市场。同时,一体化站还需向燃料电池汽车提供加氢服务。

电—氢一体化站的优化运行是以负荷侧一体化站的运行商的角度来看待问题,以一体化站总运行成本最小为目标函数,即

$$\min C = \min(C_{tr} + C_T) \quad (1)$$

式中 C 为一体化站总运行成本; C_{tr} 为一体化站参与外部电、氢气能源交易成本; C_T 为一体化站内部设备运行成本。

1) 参与外部电、氢气能源交易成本。一体化站的能源交易成本可分为 2 种,一体化站与电网的能源交易、一体化站与氢负荷用户的能源交易。

第 1 种是与电网之间的能源交易成本 C_{tr}^{ele} , 包括从电网购电、购买新能源以及通过燃料电池系统发电向电网提供调频辅助服务;其中,购电是作为一体化站的运行成本,其值为正;而向电网提供调频辅助服务为一体化站的收益。

第 2 种是一体化站与氢负荷用户的能源交易成本,是一体化站为燃料电池汽车车主提供氢能供应服务赚取收益,获得收益 $C_{tr}^{H_2}$ 。

则能源交易的总成本为

$$C_{tr} = C_{tr}^{ele} + C_{tr}^{H_2} = \sum_{t=1}^T [P_t^{ele} (\lambda_t^{ele, M} \mu_t^{ele, buy} + \lambda_t^{ele, ass} \mu_t^{ele, sell}) + P_t^{H_2} \lambda_t^{H_2}] \quad (2)$$

式中 P_t^{ele} 分别为 t 时刻从电网购买的电功率,负值表示一体化站出售的电功率; $P_t^{H_2}$ 为 t 时刻一体化站从可再生能源市场获得的电能; $P_t^{H_2}$ 为 t 时刻向燃料电池汽车用户提供的充气量, Nm^3 。 $\lambda_t^{ele, M}$ 、

$\lambda_i^{\text{ele,ass}}$ 、 $\lambda_i^{\text{ele,rc}}$ 、 $\lambda_i^{\text{H}_2}$ 分别为一体化站 t 时刻主能量市场竞得电价、电力辅助调频市场竞得电价、新能源发电的电价以及氢气市场价格； $\mu_i^{\text{ele,buy}}$ 、 $\mu_i^{\text{ele,sell}}$ 分别为 t 时刻一体化站处于购电状态、售电状态。当一体化站从主能量市场购电时， $\mu_i^{\text{ele,buy}} = 1$ ；当一体化站通过燃料电池参与电网的辅助调频服务时， $\mu_i^{\text{ele,sell}} = 1$ ；当电网不进行电能交易时，两者都为 0。

2) 站内能量转换设备运行成本。一体化站的运行成本是各个设备的运行成本之和，即

$$C_T = C_T^{\text{EL}} + C_T^{\text{FC}} + C_T^{\text{Comp}} + C_T^{\text{Sto}} = \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{EL}} \lambda^{\text{EL}} + P_t^{\text{FC}} \lambda^{\text{FC}} + P_t^{\text{Comp}} \lambda^{\text{Comp}} + \lambda^{\text{HT}}) \quad (3)$$

式中 C_T^{EL} 、 C_T^{FC} 、 C_T^{Comp} 、 C_T^{Sto} 分别为电解槽、燃料电池、压缩机和储氢站设备运行成本； λ^{EL} 、 λ^{FC} 、 λ^{Comp} 、 λ^{HT} 分别为氢电解槽、氢燃料电池、压缩机和储氢站的单位功率运行维护成本； P_t^{P2G} 、 P_t^{FC} 、 P_t^{Comp} 分别为 t 时刻电解槽、氢燃料电池和压缩机的运行功率，MW。

3.1.2 约束条件

1) 氢能功率交换约束。

$$\begin{cases} E_t^{\text{EL}} = E_t^{\text{FC}} + E_t^{\text{HT}} + L_t^{\text{H}_2}, & 0 \leq E_t^{\text{EL}} \leq E^{\text{EL,max}} \\ 0 \leq E_t^{\text{FC}} \leq E^{\text{FC,max}}, & 0 \leq L_t^{\text{H}_2} \leq L^{\text{H}_2,max} \end{cases} \quad (5)$$

式中 E_t^{EL} 、 E_t^{HT} 、 E_t^{FC} 、 $L_t^{\text{H}_2}$ 分别为 t 时刻的电解槽制氢功率、储氢系统的传输功率、燃料电池的耗氢功率、氢负荷功率， Nm^3 ； $E^{\text{EL,max}}$ 、 $E^{\text{FC,max}}$ 、 $L^{\text{H}_2,max}$ 分别为电解槽的制氢功率上限、燃料电池耗氢功率上限、燃料电池汽车负荷加氢功率上限。

2) 储氢系统约束。

$$\begin{cases} 0 \leq E_t^{\text{ET}} \leq E_t^{\text{ET,max}}, & \mu_i^{\text{H}_2,\text{in}} = 1 \\ -E_t^{\text{ET,max}} \leq E_t^{\text{ET}} \leq 0, & \mu_i^{\text{H}_2,\text{out}} = 1 \\ \mu_i^{\text{H}_2,\text{in}} + \mu_i^{\text{H}_2,\text{out}} = \{0,1\} \\ V_t^{\text{HT}} = V_{t-1}^{\text{HT}} + E_t^{\text{ET,in}} - E_t^{\text{ET,out}} \\ V^{\text{HT,min}} \leq V_t^{\text{HT}} \leq V^{\text{HT,max}} \\ [V_1^{\text{HT}} = V^{\text{HT,initial}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\mu_i^{\text{H}_2,\text{in}}$ 、 $\mu_i^{\text{H}_2,\text{out}}$ 同样是辅助变量，分别为储氢系统的加氢和放氢状态； $\mu_i^{\text{H}_2,\text{in}} = 1$ 为储氢系统处于加氢状态； $\mu_i^{\text{H}_2,\text{out}} = 1$ 为储氢系统处于放氢状态；

$E_t^{\text{ET,in,max}}$ 、 $E_t^{\text{ET,out,max}}$ 分别为储氢系统的输入功率和输出功率的最大值； V_{t-1}^{HT} 、 V_t^{HT} 为 $t-1$ 和 t 时刻的储氢系统中氢能的容量，kg； $V^{\text{HT,max}}$ 、 $V^{\text{HT,min}}$ 分别为储氢系统储氢量的上、下限； $V^{\text{HT,initial}}$ 为储氢系统开始时刻的氢容量。

3) 电功率交换约束。

$$\begin{cases} [P_t^{\text{Grid}} + P_t^{\text{FC}} = P_t^{\text{EL}} + P_t^{\text{Comp}} \\ 0 \leq P_t^{\text{Grid}} \leq P^{\text{Grid,max}}, & \mu_i^{\text{ele,buy}} = 1 \\ -P^{\text{Grid,max}} \leq P_t^{\text{Grid}} \leq 0, & \mu_i^{\text{ele,sell}} = 1 \\ \mu_i^{\text{ele,buy}} + \mu_i^{\text{ele,sell}} = \{0,1\} \\ 0 \leq P_t^{\text{FC}} \leq P^{\text{FC,max}} \\ 0 \leq P_t^{\text{EL}} \leq P^{\text{EL,max}} \\ 0 \leq P_t^{\text{Comp}} \leq P^{\text{Comp,max}} \\ [\mu_i^{\text{ele,sell}} \mu_i^{\text{ele,buy}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 P_t^{Grid} 、 P_t^{EL} 、 P_t^{FC} 、 P_t^{Comp} 为 t 时刻电网传输功率、电解槽耗电功率、燃料电池的输出功率、压缩机的运行功率； $P^{\text{Grid,max}}$ 、 $P^{\text{FC,max}}$ 、 $P^{\text{EL,max}}$ 、 $P^{\text{Comp,max}}$ 分别为电网与一体化站电功率传输、燃料电池的输出功率、电解槽耗电功率、压缩机运行功率的上限。

4) 能量传输约束。电解槽制氢功率为

$$E_t^{\text{EL,H}_2} = \eta_{\text{EL}} P_t^{\text{EL,ele}} \quad (8)$$

式中 η_{EL} 为电解槽转换效率， $\text{Nm}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ； $P_t^{\text{EL,ele}}$ 为电解槽输入的电功率。

根据文献[22]，氢燃料电池的简化输出电功率为

$$P_t^{\text{FC,ele}} = \eta_{\text{FC}} E_t^{\text{FC,H}_2} \quad (10)$$

式中 $E_t^{\text{FC,H}_2}$ 为氢燃料电池输入的氢量； η_{FC} 为氢燃料电池电效率， $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 。

压缩机耗能与储氢罐的输入氢量有关，则压缩机耗能为

$$P_t^{\text{Comp}} = \eta_{\text{Comp}} E_t^{\text{Comp,i}} \quad (11)$$

式中 η_{Comp} 为不同变压等级的压缩机 i 的转换效率； $E_t^{\text{Comp,i}}$ 为 t 时段注入压缩机的氢量， Nm^3 。

4 仿真算例

4.1 一体化站基本数据输入

本文以某配电网实际数据运行为例，一体化

站的关键设备配置如表 1 所示。该区域的分时电价如表和燃料电池汽车的日需求曲线如图 5 所示,该地区的可再生能源发电预测测量如图 6 所示。除此以外,氢能的售价为 37 元/kg,新能源的电价为 0.29 元/(kW·h),调频服务市场的电价以 4 元/(kW·h)。一体化站的运行优化模型在 Matlab 环境下应用 Yalmip 工具箱建模并调用 CPLEX 优化工具求解。

表 1 算例装置的相关参数

Table 1 Related parameters of the calculation example device

类型	参数名称	数值	单位
电解槽	转换效率 η_{EL}	0.85	%
	每 kW·h 电能制取的氢气量	0.25	Nm ³
	容量	5	MW
	运行成本 λ_{EL}	18	元/MW
燃料电池	转换效率 η_{FC}	0.65	%
	生产 1 kW·h 电能需要的氢气量	0.28	Nm ³
	容量	5	MW
储氢设备	运行成本 λ_{FC}	20	元/MW
	储氢质量	1 000	kg
	运行效率 η_{HT}	0.95	%
	日加注上限	750	kg
	加注压力	35/70	MPa
压缩机	运营成本 λ_{HT}	28.5	元/t
	运行效率 η_{Comp}	0.85	%
	气体排量	1 800	Nm ³ /h
	运行成本 λ_{Comp}	50	元/h

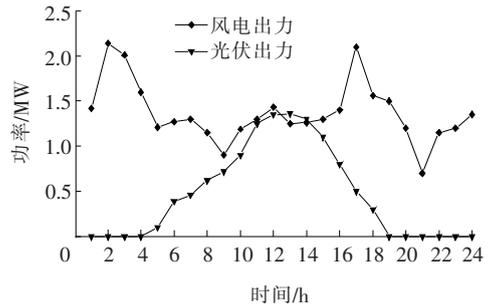


图 6 风电与光伏预测值

Figure 6 Forecast of wind power and photovoltaics

4.2 一体化站运行状态集求解

为了研究外部的电价变化以及燃料电池汽车加氢需求变化对一体化站运营策略的影响,本文对一体化站的运行状态集进行求解。由于一体化站的主要业务是售氢的服务,氢价的价格远高于电价,且相对稳定。因此,一体化站首先需要满足氢负荷的需求,通过电解槽制取相应的氢气。

对氢负荷、储氢站进行分级,用于一体化站控制指令的判定条件。级别划分的越多,则一体化站运行模式的解集也越多,对优化的效果越好。为了减少计算的时间,类比分时电价,将氢负荷划分为峰荷、腰荷和谷荷。分时氢负荷如图 7 所示。

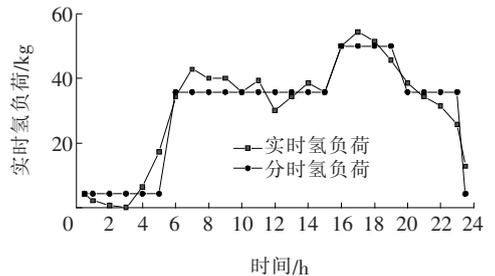


图 7 分时氢负荷

Figure 7 Time-sharing hydrogen load

为了便于一体化站做出运行的决策,本文分析了一体化站的运行方式的全部解集,共分为以下 4 种运行模式。

1)购电储氢模式。在电价处于谷时或者储氢站的剩余氢量不足时,综合考虑燃料电池汽车的负荷情况以及储氢站的剩余容量,一体化站需从电网中购买电能用于制氢。除去用于当前的氢负荷需求,剩余的氢气将存储到储氢站中。

2)储能支撑模式。在电价处于峰时或者电网有调频调峰需求时,综合考虑当前的储氢站的容量以

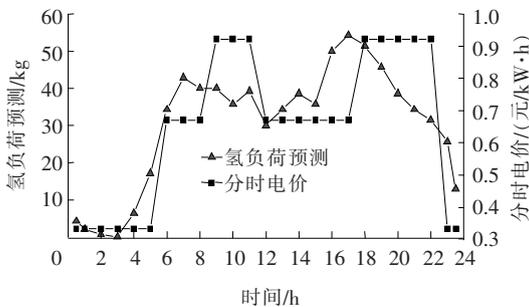


图 5 分时电价与氢燃料电池汽车需求预测曲线

Figure 5 Time-of-use electricity price and hydrogen fuel cell vehicle demand forecast curve

及调速约束,控制站内燃料电池的发电功率,以达到竞标的调频量。同时,需保证一体化站储氢站的剩余氢量可供于当前和未来的燃料电池负荷的加氢需求。当市场环境下调频服务收益优于氢能存储的损耗成本,一体化站做出支撑电网的决定。

3)双供模式。当氢负荷处于高需求而储能站的输氢速率不足时,综合考虑售氢成本与购电成本,配置制氢站和储氢站的输出占比,使两者同时处于供氢状态。

4)清洁模式。清洁模式是当氢负荷和电网负荷同时处于腰荷时,常规购电成本较高时,通过同时消纳实时电网中过剩的可再生能源制氢以及输出储氢站中的氢能,实现一体化站中储能的节约运行和可再生能源的消纳,此时的氢能供应只来源于可再生能源的不同时间尺度上的转化,因此称为清洁模式。

一体化站的运行方式的全部解集如图8所示。将各个时刻的氢需求和常规电价、清洁能源消纳量、能源转换系数等数据代入到4种解集中计算,以一体化站的运行成本作为目标,可计算出日内一体化站各时刻的运行模式。

此基础上显示了不同模式下站内能量流动方向以及不同设备的开关运行状态。为方便描述, S_{EL} 为制氢站, S_{HT} 为储氢站, S_{FC} 为燃料电池发电站, L_{H2} 为燃料电池汽车负荷, G 为电网。实现能量互动(能量流动的方向采用“ \rightarrow ”表示)。

开关量状态根据设备类型,分为单向开关和双向开关, $\mu_{\text{单向}} = \{0,1\}$,0/1为停运/运行; $\mu_{\text{双向}} = \{0,1,-1\}$,0/1/-1为停运/输入/输出。

表2 一体化站不同运行状态的能流

Table 2 Energy flow of the integrated station in different operating states

模式	电价	氢负荷	能源流向	开关量	状态
购电 储能	谷时	谷荷	$G \rightarrow S_{EL} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow S_{HT}$	μ^{EL}	1
			$G \rightarrow S_{EL} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{buy}	1
				μ^{HT}	1
				μ^{FC}	0
储能 支撑	峰时	谷荷/ 腰荷/ 峰荷	$S_{HT} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{EL}	0
			$S_{HT} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow S_{FC}$	μ^{sell}	1
				μ^{HT}	-1
				μ^{FC}	1
双供	谷时/ 平时	峰荷	$G \rightarrow S_{EL} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{EL}	1
			$S_{HT} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{buy}	1
				μ^{HT}	-1
				μ^{FC}	0
清洁	谷时/ 平时	腰荷	$G \rightarrow S_{EL} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{EL}	1
			$S_{HT} \rightarrow S_{Comp} \rightarrow L_{H2}$	μ^{buy}	0
				μ^{HT}	-1
			μ^{FC}	0	

根据电网电价、新能源发电量及氢负荷需求实时变化,一体化站与电网的电能交易优化结果如图9所示;一体化站中的电-氢转换及氢储装置出力优化仿真结果如图10所示。由图9、10可知,在23:00—05:00电网处于谷时电价,氢负荷需求较小,一体化站在购电储能模式下运行,通过电解槽、储氢站、压缩机的协调运行,在满足氢负荷需求的同时,实现对储氢站的高效储氢,并在06:00点时刻,储氢站达到峰值。在06:00—08:00时间段,电价处于腰时价格,氢负荷需求逐渐上升。由于电网中存在着可再生能源发电,一体化站运行在清洁模式。此时储能站含有大量夜间购买清洁能源制好的“低

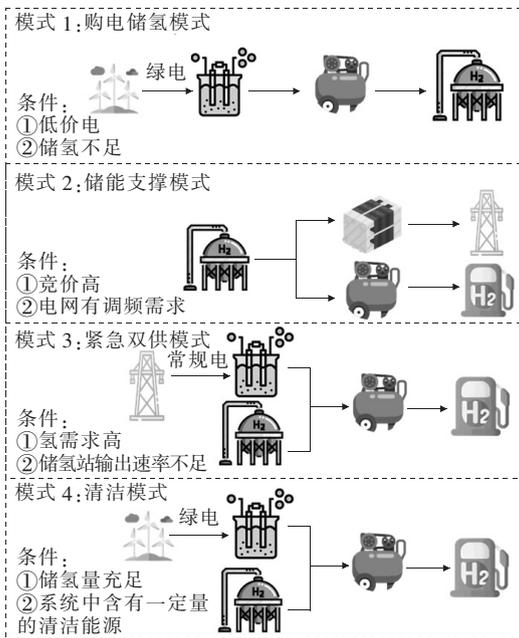


图8 一体化站运行方式的解集

Figure 8 Solution sets of integrated station operation mode

根据一体化站以上列出的4种运行模式,得到的具体能源流向如表2所示。表2显示了不同模式下所发生的电价场景以及氢负荷场景的特征,并在

价”氢能,为了节约运行成本和避免氢能在储氢罐中的损耗,此时的一体化站将同时调度储氢装置的输出和制氢装置的输出,保证氢负荷的供应。由于通过购买可再生能源制氢缓解了储能站的氢能供应压力,因此储能站的运行特点是以低速方式输出氢能。而在 12:00—16:00 时间段,由于一体化站需要保证峰时电价时刻的氢负荷供应,一体化站需要在平时电价购电补充一定量的电能,所以一体化站同时处于双供模式。在 09:00—11:00、18:00—22:00 电网处于峰时电价时,同时一体化站向电网提供调峰服务获得收益,此时一体化站运行于储能支撑模式,储氢站处于高强度放能的状态。

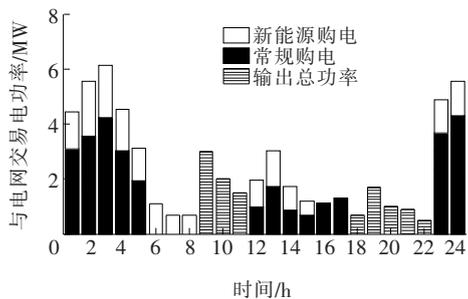


图 9 一体化站与电网交易的优化仿真结果

Figure 9 Optimization simulation results of the transaction between the integrated station and the grid

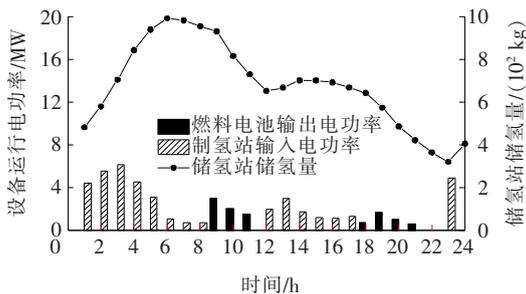


图 10 一体化站内部设备运行优化仿真结果

Figure 10 Optimization simulation results of internal equipment operation in the integrated station

4.3 优化结果

基于文 4.2 节的一体化站运行状态解集,结合优化模型的目标函数和约束条件,则弃风弃光率对比如表 3 所示,一体化站整体的运行成本如表 4 所示。

由表 3 可知,一体化站单日的风电消纳电量达 12.27 MW,结合图 6、10 的优化结果可知,一体化站在夜间将过剩的风电和白天未利用的光伏发电利用来制氢,从而达到降低弃风弃光的效果。从配置

一体化站前后地区的新能源发电的利用率变化来看,配置一体化站能够大幅提高了地区的新能源消纳能力。因此,本文提出的一体化站可在满足燃料电池汽车的氢需求的基础上,有效地降低地区弃风弃光现象。

表 3 新能源模型优化结果

Table 3 New energy model optimization results

类别	一体化站日消纳电量/MW	未配置一体化站新能源的利用率/%	配置一体化站后新能源的利用率/%
风电	12.27	45.5	82.8
光伏	4.25	54.7	89.5
新能源	16.52	48.0	84.6

表 4 一体化站日运行成本

Table 4 Daily operating cost of the integrated station

成本类型	子成本类型	成本/元
能源交易	现货电能交易	-17 232.27
	新能源购电	-4 790.80
	售氢收益	27 591.43
	售电收益	22 600.00
	电解槽	-847.56
设备运行	燃料电池	-226.00
	压缩机	-1 200.00
	储氢设备	-463.78
一体化站总收益/元		25 431.02

由表 4 可知,一体化站的日运行成本主要集中在电能购买消耗中,同时新能源的购电成本低于现货市场的购电成本。通过本文的优化算法可得到的不同市场状态下一体化站的多种运行模式,从而实现购电成本以及设备运行成本的最优。虽然在能源转换和存储的过程中有一定的能源损耗,但是氢能的成本更高以及具有可储性的特点,使得一体化站可以实现获利以及削峰填谷的目标。

4 结语

本文构建了电力市场下电—氢一体化站的优化运行模型,结合算例仿真,得出以下结论。

1) 针对一体化站的运行商,参与常规购电交易、可再生交易、调频辅助服务多种交易机制,有利于降低一体化站的运行成本和促进电网与负荷的交互。

2)电—氢一体化站的主要运行成本集中在电能购买,由于可再生购电成本更低,因此电网中可再生能源发电的比例越高,一体化站的购电成本越低。同时,配置一体化站后新能源消纳比例提高了36.6%,因此,一体化站对于高比例新能源接入电网具有互利的效果。

3)由于各种能源的价格与一体站的运行成本强关联,单一的能源价格增长将导致一体化站运行成本急剧增长,为了提高一体化站的抗风险能力与总运行成本的降低,一体化站需拓宽更多的盈利模式,参与更多能源市场的交易。

参考文献:

- [1] 高久国,赵艳龙,朱司丞,等.考虑光伏并网的电力系统无功优化[J].电测与仪表,2020,57(14):69-73.
GAO Jiuguo,ZHAO Yanlong,ZHU Sicheng,et al. Optimal reactive power dispatch considering photovoltaic integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(14):69-73.
- [2] 何玉鹏,王杰,董颖华,等.配电网中的分布式光伏系统发电性能仿真[J].中国电力,2021,54(2):127-132.
HE Yupeng,WANG Jie,DONG Yinghua,et al. Simulation of operational performance of pv systems in distribution network[J]. Electric Power,2021,54(2):127-132.
- [3] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等.分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J].供用电,2020,37(2):60-66.
LIANG Weihao,ZHOU Chao,TU Zhihao,et al. Fast evaluation method of the impact of distributed photovoltaic access on the reliability of distribution network[J]. Distribution & Utilization,2020,37(2):60-66.
- [4] 国家能源局.2019年重点专项监管报告[EB/OL].(2020-07-27).http://zfxxgk.nea.gov.cn/2020-07/27/c_139254469.htm.
- [5] 周兵兵,林宏宇,杨莘博,等.可再生能源多能互补系统多主体效益均衡模型[J].智慧电力,2020,48(1):74-79.
ZHOU Bingbing,LIN Hongyu,YANG Shenbo,et al. multi-agent benefit equilibrium model for renewable energy in multi-energy complementary system[J]. Smart Power,2020,48(1):74-79.
- [6] 刘德旭,刘艳,潘永旗,等.基于可再生能源发电优先消纳的电力电量平衡模型研究[J].电网与清洁能源,2020,36(1):64-71.
LIU Dexu,LIU Yan,PAN Yongqi,et al. Research on power balance model based on priority consumption of renewable energy power generation[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(1):64-71.
- [7] 白斌,韩明亮,林江,等.含风电和光伏的可再生能源场景削减方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):141-149.
BAI Bin,HAN Mingliang,LIN Jiang,et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic[J]. Power System Protection and Control,2021,49(15):141-149.
- [8] 李虹,刘瑞叶,高挺.考虑风电消纳的电动汽车有序充电策略研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):16-22.
LI Hong,LIU Ruiye,GAO Ting. Research on coordinated charging strategy of electric vehicles considering wind power accommodation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2017,32(1):16-22.
- [9] 李宏仲,房宇娇,肖宝辉.考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J].电网技术,2019,43(9):3130-3138.
LI Hongzhong,FANG Yujiao,XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Power System Technology,2019,43(9):3130-3138.
- [10] 王振浩,杨璐,田春光,等.考虑风电消纳的风电—电储能—蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):137-143.
WANG Zhenhao,YANG Lu,TIAN Chunguang,et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(S1):137-143.
- [11] 张儒峰,姜涛,李国庆,等.考虑电转气消纳风电的电—气综合能源系统双层优化调度[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5668-5678+5924.
ZHANG Rufeng,JIANG Tao,LI Guoqing,et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(19):

- 5668-5678+5924.
- [12] 许志恒,张勇军,陈泽兴.考虑 P2G 备用服务的电—气联合网络风电消纳及低碳效益分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):36-45.
- LIANG Ji,ZUO Yi,ZHANG Yuzhuo,et al. The benefit on wind power accommodation and low carbon effects of integrated electricity and gas network considering reserve service of P2G facilities[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 36-45.
- [13] 张翔,陈政,马子明,等.适应可再生资源配额制的电力市场交易体系研究[J].电网技术,2019,43(8):2682-2690.
- ZHANG Xiang,CHEN Zheng,MA Ziming,et al. Study on electricity market trading system adapting to renewable portfolio standard[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [14] 刘佳楠,熊宁,朱文广,等.电力市场环境下风光储联合运行优化策略[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):11-15.
- LIU Jianan,XIONG Ning,ZHU Wenguang,et al. Research on optimal strategy of wind-PV-ES hybrid operation in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 11-15.
- [15] 李健强,余光正,汤波,等.考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):11-20.
- LI Jianqiang,YU Guangzheng,TANG Bo,et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [16] QADRAN M, ABEYSEKERA M, CHAUDRY M, et al. Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(17): 5763-5775.
- [17] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated electrical and gas network flexibility assessment in low-carbon multi-energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 718-731.
- [18] 滕云,王泽镛,金红洋,等.用于电网调节能力提升的电热氢多源协调储能系统模型[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7209-7217.
- TENG Yun,WANG Zedi,JIN Hongyang,et al. A model and coordinated optimization for the multi-energy storage system of electricity heat hydrogen to regulation enhancement of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7209-7217.
- [19] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电—气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4609.
- WEI Zhinong,ZHANG Side,SUN Guoqiang,et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609.
- [20] 邓浩,陈洁,焦东东,等.风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J].高电压技术,2020,46(1):99-106.
- DENG Hao,CHEN Jie,JIAO Dongdong,et al. Control strategy for energy management hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 99-106.
- [21] 国家发展改革委,工业和信息化部,国家能源局.中国制造 2025-能源装备实施方案[EB/OL].(2016-06-20).http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/20/content_5083796.htm.
- [22] 金红洋,滕云,冷欧阳,等.基于源荷不确定性状态感知的无废城市多能源协调储能模型[J].电工技术学报,2020,35(13):2830-2842.
- JIN Hongyang,TENG Yun,LENG Ouyang,et al. Multi-energy coordinated energy storage model in zero-waste cities based on situation awareness of source and load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2830-2842.