

# 电 - 氢 - 交通一体化的综合能源系统调度研究

马艳红

广东电网有限责任公司管理科学研究院, 广东 广州

收稿日期: 2023年10月23日; 录用日期: 2023年12月18日; 发布日期: 2023年12月29日

## 摘要

考虑可再生能源的普及和氢能源汽车的广泛应用对城市综合能源系统的影响, 本文构建了氢能源汽车接入对城市配电网影响的时空模型。同时, 为实现能源综合系统的低成本运行, 提出了基于电、氢、交通耦合的能源综合系统成本优化方法。最后, 在IEEE-33节点系统仿真结果验证了模型与方法的有效性。

## 关键词

氢能源汽车, 配电网, 加氢站, 优化调度

## Research on Scheduling Integrated Energy Systems Considering Electricity-Hydrogen-Vehicle Integration

Yanhong Ma

Management Science Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Considering the impact of the popularization of renewable energy and the widespread application of hydrogen energy vehicles on urban comprehensive energy systems, this paper constructs a spatiotemporal model of the impact of hydrogen-powered vehicle integration on urban distribution networks. At the same time, in order to achieve low-cost operation of the energy integrated system, a cost optimization method based on the coupling of electricity, hydrogen, and transportation has been proposed. Finally, the simulation results of the IEEE-33 node system verified the effectiveness of the model and method.

## Keywords

### Hydrogen-Powered Vehicle, Distribution Network, Hydrogen Refueling Station, Optimization Scheduling

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

为了减少全球温室气体排放并缓解城市环境污染，人们开始认识到氢能源的潜力，它被认为是 21 世纪的“终极能源”[1]。根据制氢的来源，工业界常通过颜色将氢能源划分为三类，即灰氢、蓝氢和绿氢，然而灰氢与蓝氢一方面会产生大量的碳排放，另一方面面临不可持续的问题，不符合能源转型的要求[2]。绿氢即电转氢技术可以将电能转化为氢气，不仅满足发展要求，而且能提高能源系统的灵活性。氢能源汽车的普及推动了城市综合能源系统与氢能源汽车加氢站的密切结合，使得氢能负荷成为城市综合能源系统中不可忽视的一部分。鉴于加氢站在城市配电网和城市交通系统中扮演着重要角色，对于加氢站的规划调度显得尤为关键。

随着氢能源汽车的普及和制氢技术的不断进步，学术界已对加氢站优化调度问题进行了深入研究。在文献[3]中，研究人员针对电力系统、运输系统和可再生能源的限制条件，提出了协调制氢、运输和储存阶段的策略。另一方面，文献[4]提出了一种以长期盈利能力最大化为目标的加氢站规划模型，该模型利用容量流加氢选址模型来最大化交通流覆盖。除此之外，研究人员还积极探索了氢能源与城市配电网系统的耦合，努力开发与其他系统耦合的综合能源系统。在文献[5]中，研究人员通过考虑电力和氢气之间的双向相互作用，探讨了基于可再生氢站和油罐车车队的综合能源流动系统。此外，文献[6]提出了一种应对多种不确定条件的氢基网络化微电网规划的混合整数二次规划资源决策的两阶段随机方程。

基于前述研究，本文关注氢能源汽车融入城市能源系统对加氢站电能负荷的影响。因此，提出了一种综合能源系统模型，将配电网、氢能源和城市交通系统结合，以最小化运营成本为目标进行优化调度。具体组织结构如下：第二节构建了基于城市配电网、交通系统和加氢站的耦合模型。第三节提出了综合能源模型的优化目标函数。第四节通过案例分析模型的调度结果，验证了其有效性。

## 2. 电 - 氢 - 交通耦合模型

### A) 城市配电网模型

在城市配电网模型中，假设所有氢能源汽车加氢站都由配电网供电。供电设备包括风力发电、太阳能发电和天然气发电机组。为满足确定性负荷，配电网节点均直接连接到发电机组。因此，本文使用以下配电网潮流模型[7]：

$$\sum_{i \in b} P_{Gi,t} + P_t^{WT} + P_t^{PV} - P_{b,t}^N - P_{e,t}^E = \sum_{k(b,:) \in b} P_{k,t}^{DN} - \sum_{l(b,:) \in b} P_{l,t}^{DN} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in b} Q_{Gi,t} - Q_{b,t}^N = \sum_{k(b,:) \in b} Q_{k,t}^{DN} - \sum_{l(b,:) \in b} Q_{l,t}^{DN}, i \quad (2)$$

$$U_{b',t} - (r_l P_{k,t}^{DN} + x_l Q_{k,t}^{DN}) / U_N = U_{b,t} \quad (3)$$

$$U_{\min} \leq U_{b,t} \leq U_{\max} \quad (4)$$

其中式中： $P_{Gi,t}/Q_{Gi,t}$  为机组  $G_i$  的有功/无功； $P_i^{WT}$  表示风力发电的有功； $P_i^{PV}$  表示太阳能发电的有功； $P_{b,t}^N/Q_{b,t}^N$  为节点  $b$  的有功/无功负荷； $P_{l,t}^{DN}$  表示经线路  $l$  注入节点  $b$  的有功功率； $P_{e,t}^E$  为电解槽消耗的有功功率； $P_{k,t}^{DN}$  表示从  $b$  经线路  $k$  注入其他节点的有功功率； $Q_{l,t}^{DN}$  表示经线路  $l$  注入节点  $b$  的无功功率； $Q_{k,t}^{DN}$  表示从  $b$  经线路  $k$  注入其他节点的无功功率； $U_{b,t}$  为节点  $b$  的电压值； $U_N$  表示额定电压值； $r_l$  和  $x_l$  表示线路  $l$  的电阻和电抗值。

对于天然气发电机组的建模如下所示，(5)~(8)表示发电机组的启停约束，(9)~(10)表示发电机组的发电上下限约束，(11)~(12)表示发电机组的爬坡约束。

$$\left[ t_{Gi,(t-1)}^{on} - T_{Gi\min}^{on} \right] \left[ I_{Gi,(t-1)} - I_{Gi,t} \right] \geq 0 \quad (5)$$

$$\left[ t_{Gi,(t-1)}^{off} - T_{Gi\min}^{off} \right] \left[ I_{Gi,t} - I_{Gi,(t-1)} \right] \geq 0 \quad (6)$$

$$u_{Gi,t} - v_{Gi,t} = I_{Gi,t} - I_{Gi,(t-1)} \quad (7)$$

$$u_{Gi,t} + v_{Gi,t} \leq 1 \quad (8)$$

$$I_{Gi,t} P_{Gi\min} \leq P_{Gi,t} \leq I_{Gi,t} P_{Gi\max} \quad (9)$$

$$I_{Gi,t} Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi,t} \leq I_{Gi,t} Q_{Gi\max} \quad (10)$$

$$P_{Gi,t} + R_{Gi,t}^{up} - \left[ P_{Gi,(t-1)} - R_{Gi,(t-1)}^{down} \right] \leq U_{Gi}^R \quad (11)$$

$$P_{Gi,(t-1)} + R_{Gi,(t-1)}^{up} - \left( P_{Gi,t} - R_{Gi,t}^{down} \right) \leq D_{Gi}^R \quad (12)$$

$t_{Gi,(t-1)}^{on}/t_{Gi,(t-1)}^{off}$  为机组  $g$  至时段  $t-1$  的开机/停机持续时间； $I_{Gi,t}$  表示机组在时段  $t$  的开停机状态，取值为 1 表示开机态，取值为 0 表示停机态； $T_{Gi\min}^{on}/T_{Gi\min}^{off}$  为机组的最小启动/停机时间。二进制变量  $u_{Gi,t}$  取值为 1 表示机组在时段  $t$  处于开机过程，否则为 0；二进制变量  $v_{Gi,t}$  取值为 1 表示机组在时段  $t$  处于停机过程，否则为 0。 $P_{Gi\max}/P_{Gi\min}$  为机组有功出力的上/下限； $Q_{Gi\max}/Q_{Gi\min}$  为机组  $G_i$  无功出力的上/下限。 $R_{Gi,t}^{down}/R_{Gi,t}^{up}$  为机组在时段  $t$  的上/下有功备用容量； $U_{Gi}^R/D_{Gi}^R$  为机组的向上/向下爬坡速率。

氢能汽车加氢站包括电解槽，储氢站和加氢设备。本文将电转氢阶段作为能源综合优化调度的柔性资源，一般是通过电解槽电解水将电能转化为氢能。作为配电网与城市交通系统之间的耦合环节，提出了以下电解槽模型：

$$P_{e,t}^{H_2} = \eta_e P_{e,t}^E \quad (13)$$

$$P_e^{E\min} \leq P_{e,t}^E \leq P_e^{E\max} \quad (14)$$

$$u_{e,t} + v_{e,t} \leq 1 \quad (15)$$

$$\Delta P_e^{E\min} \leq P_{e,t}^E - P_{e,t-1}^E \leq \Delta P_e^{E\max} \quad (16)$$

其中， $\eta_e$  为电解槽的制氢效率， $P_{e,t}^{H_2}$  为电解槽产生的氢能， $P_e^{E\min}$  和  $P_e^{E\max}$  分别为电解槽消耗电能的阈值约束， $u_{e,t}$  和  $v_{e,t}$  代表电解槽的启停状态， $\Delta P_e^{E\min}$  和  $\Delta P_e^{E\max}$  分别为电解槽的爬坡速率的上下限。

储氢站是配电网和城市交通网之间的耦合环节之一。电解槽电解水所产生的氢气以液态氢的形式储存在储氢站，以供氢能汽车加氢使用。对储氢站的充放能约束如下：

$$0 \leq P_{s,t}^{cha} \leq B_{s,t}^{cha} P_s^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{dis} \leq B_{s,t}^{dis} P_s^{\max} \quad (18)$$

$$P_{s,t} = P_{s,t}^{cha} \eta_s^{cha} - P_{s,t}^{dis} / \eta_s^{dis} \quad (19)$$

$$S_{s,t} = S_{s,t-1} + P_{s,t} \quad (20)$$

$$S^{\min} \leq S_{s,t} \leq S^{\max}, t \quad (21)$$

$P_{s,t}^{cha}$ 、 $P_{s,t}^{dis}$  为储氢站在时间段  $t$  氢能的充放功率， $P_s^{\max}$  为储氢站单次最大充放功率， $B_{s,t}^{cha}$ 、 $B_{s,t}^{dis}$  分别为储氢站在时间段  $t$  的充放标志， $\eta_s^{cha}$ 、 $\eta_s^{dis}$  为储氢站的充放效率， $S_{s,t}$  为时间段  $t$  储氢站的剩余容量， $P_{s,t}$  为储氢站在时间段  $t$  总输出的氢能， $S^{\max}$ 、 $S^{\min}$  为储氢站容量的上下限。

### B) 城市交通网模型

用  $G(\mathbf{V}, \mathbf{E})$  表示路网的图，其中  $\mathbf{E}$  为边集，即为路网道路的集合； $\mathbf{V}$  为顶点集合，即道路中路段的端点或多个路段交叉点的集合。在该结构中，假设所有的路段都是双向道，矩阵  $\mathbf{D}$  表示道路权值的连接矩阵，用于描述各路段长度和节点的连接关系[7]。生成  $\mathbf{D}$  矩阵后，利用最短路径算法即可快速获取氢能源汽车行驶路线的最短行驶路径方案。

本文对氢能源汽车的出行特性按照用户出行规律进行建模，氢能源汽车的初始电池电量遵循均匀分布  $SOC_s \sim U(0.3, 0.9)$ 。氢能源汽车初始出行时间抽样服从正态分布  $t_s \sim N(8.0, 1.14)$ ，如下所示[8]。

$$t_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{t_s}^2}} e^{-\frac{(t-\mu_{t_s})^2}{2\sigma_{t_s}^2}} \quad (22)$$

本文假设氢能源汽车的电池荷氢量随行驶距离线性降低。通过逐时跟踪，氢能源汽车的实时电池容量。因此，车辆行驶时的电池约束条件如下[8]：

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \xi L_{n,n'} \quad (23)$$

其中  $SOC_t$  表示氢能源汽车在时间  $t$  的电池容量， $L_{n,n'}$  表示道路网中氢能源汽车在道路网由节点  $n$  到  $n'$  中的行驶时段  $t$  行驶的长度。

## 3. 优化目标函数

### 模型构建

本节提出了一种基于配电网、城市交通系统和天然气网络耦合的综合能源系统优化模型，如(24)所示。优化目标函数主要包括三部分：i) 城市交通系统运行成本：电解槽运行成本，储氢罐运行成本和车辆道路行驶利润。ii) 配电网运行成本：发电机运行成本和启停成本。iii) 加氢站运行耗电量峰谷差最低。

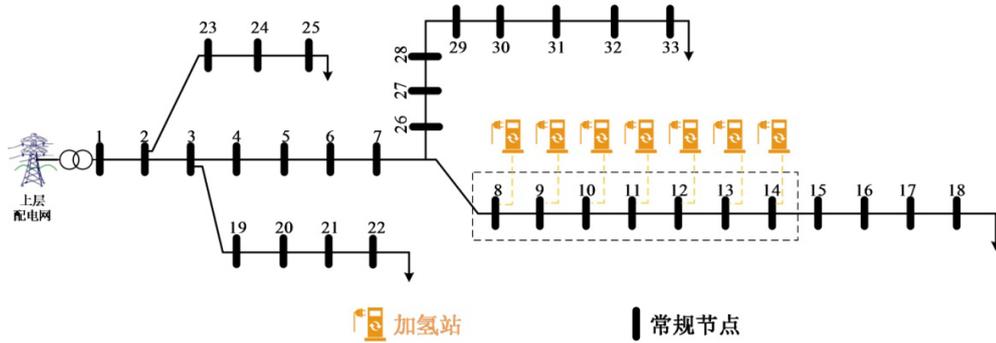
$$\begin{cases} \min F = F_1 + F_2 + F_3 \\ F_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in G} \left[ a_{Gi} (P_{Gi,t})^2 + b_{Gi} P_{Gi,t} + c_{Gi} \right] + C_{Gi}^{on} u_{Gi,t} + C_{Gi}^{off} v_{Gi,t} \\ F_2 = \sum_{t \in T} \left[ \sum_{e \in E} C_e^{on} u_{e,t} + \sum_{e \in E} C_e^{off} v_{e,t} + \sum_{v \in V} C^{road} L_{v,n,n'} \right] \\ F_3 = \sum_{t \in T} \sum_{e \in E} \left| \bar{P}_{e,t}^E - P_{e,t}^E \right| \\ \text{s.t. (1) - (23)} \end{cases} \quad (24)$$

式中： $a_{Gi}$ 、 $b_{Gi}$  和  $c_{Gi}$  为时段机组的发电成本系数， $C_{Gi}^{on} / C_{Gi}^{off}$  表示机组的启/停成本， $C_e^{on} / C_e^{off}$  为电解槽的启停成本， $C^{road}$  为道路行驶成本， $\bar{P}_{e,t}^E$  表示电解槽在调度周期内的平均功率。

## 4. 算例分析

### A) 参数设置

本文算例分析模型采用 IEEE-33 配电网，如图 1 所示[9]，是一个经典的电力系统模型，用于研究和设计中低压配电网。城市配电网包含分布式氢能汽车加氢站外和天然气发电机组，天然气发电机组参数如表 1 所示[10] [11] [12] [13] [14]；道路网参数如表 2 所示路网节点数量为 40 个，其中有 7 个氢能汽车加氢站，加氢站的位置由实际交通网耦合关系所决定。结合普查结果，考虑到该地区的人口和车辆拥有量，将氢能汽车数量定为 2000 辆。仿真建模和算例分析环境为 MATLAB 2022b，采用 CPLEX 求解器对算法进行求解。



**Figure 1.** Connection relationship between hydrogen refueling station and urban distribution network  
**图 1.** 加氢站和城市配电网连接关系

**Table 1.** Parameters of natural gas generators  
**表 1.** 天然气发电机的参数

参数	发电机 1	发电机 2
$T_{Gi \max}^{on}$	5	3
$T_{Gi \min}^{off}$	2	1
$P_{Gi \max}$	1040	850
$P_{Gi \min}$	50	60
$U_{Gi}^{ramp}$	500	300
$D_{Gi}^{ramp}$	500	300
$a_{Gi}$	0.77	0.009
$b_{Gi}$	19.71	21.02
$c_{Gi}$	1469	2639
$C_{Gi}^{on}$	1500	3000
$C_{Gi}^{off}$	2000	4000

**Table 2.** Traffic road parameters  
**表 2.** 交通道路参数

线路	距离 (km)	线路	距离 (km)	线路	距离 (km)
(1, 2)	4.0	(13, 14)	4.1	(24, 32)	4.0
(1, 8)	3.2	(13, 21)	3.3	(25, 26)	2.6
(2, 3)	3.4	(14, 15)	3.8	(26, 27)	2.8
(2, 9)	3.8	(14, 23)	4.6	(27, 28)	4.4
(3, 4)	4.1	(15, 16)	3.3	(27, 34)	3.6

Continued

(4, 5)	4.2	(16, 17)	3.3	(28, 34)	4.1
(4, 11)	4.7	(16, 24)	4.1	(29, 30)	2.7
(5, 6)	4.3	(17, 18)	3.0	(29, 35)	3.8
(5, 12)	3.5	(17, 25)	4.7	(30, 31)	2.3
(6, 7)	3.9	(18, 19)	3.8	(31, 32)	4.1
(7, 11)	4.0	(18, 26)	4.6	(31, 36)	4.2
(8, 9)	4.8	(19, 20)	4.4	(32, 33)	3.5
(8, 13)	3.1	(19, 27)	3.9	(32, 37)	3.1
(9, 10)	3.6	(20, 28)	3.9	(33, 34)	5.8
(9, 14)	5.4	(21, 22)	2.7	(33, 38)	5.1
(10, 11)	4.3	(21, 29)	4.3	(34, 40)	3.8
(10, 15)	3.2	(22, 23)	2.8	(35, 36)	3.4
(11, 12)	3.7	(22, 30)	4.3	(36, 37)	3.3
(11, 16)	3.1	(23, 24)	4.6	(37, 38)	3.8
(12, 18)	4.0	(23, 31)	4.3	(38, 39)	4.3
(12, 19)	5.2	(24, 25)	3.2	(39, 40)	3.1

## B) 算例分析

本文对有氢能源汽车接入的城市综合能源系统进行建模，并将最小社会成本作为目标函数对各个环节进行优化调度。为了研究本模型的可行性，氢能源汽车接入城市综合能源系统时，本节将对加氢站的优化调度和城市配电网中的负荷变化进行研究。

配电网总体负荷功率示意图如图 2 所示。配电网负荷包括 IEEE-33 配电网基本负荷、电动汽车充电负荷和制氢电解槽用电负荷。

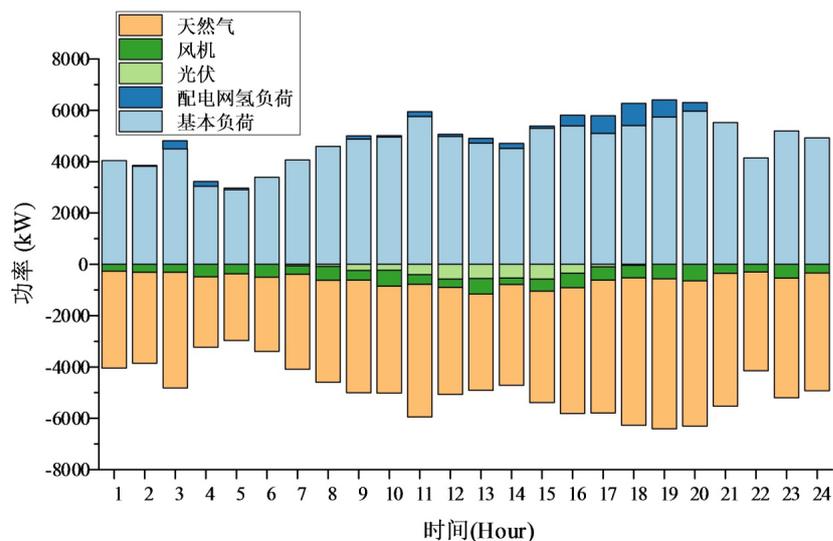


Figure 2. Power balance of urban integrated energy system

图 2. 城市综合能源系统功率平衡

图 3 表示氢能源汽车的需求和加氢站中电解槽和储氢罐的调度情况。结合图 2 和图 3 可见，氢能源

汽车的加氢需求集中在 17:00~21:00 之间。在目标函数的作用下, 电解槽提前制氢将氢气存储到储氢罐, 使得氢能负荷随时间波动变小。由此可见, 储氢站作为城市配电网和城市交通系统的耦合环节的一个部分, 起到了缓冲氢能源汽车加氢需求的作用, 可以环节加氢需求高峰时期城市配电网的供电压力和电解槽的产氢压力。

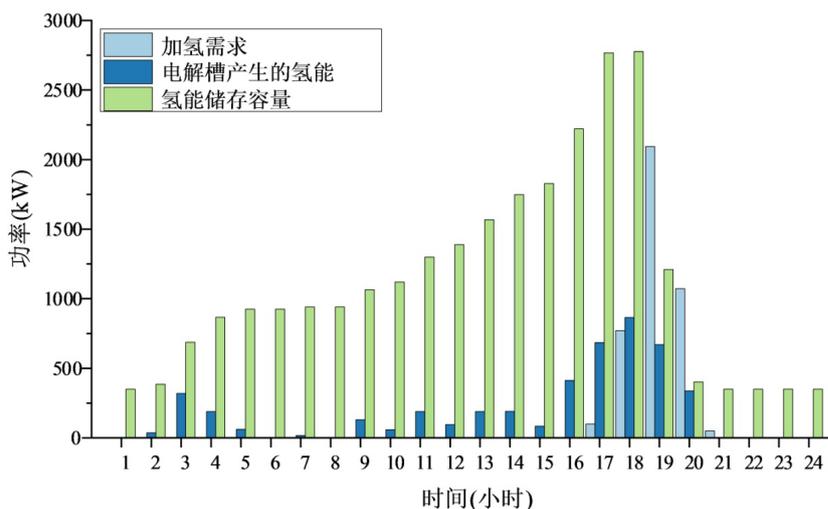


Figure 3. Optimal scheduling results of hydrogen refueling stations  
图 3. 加氢站优化调度结果

## 5. 总结

本文提出了一种针对城市综合能源系统的优化方法, 其中考虑了氢能源汽车所需的氢负荷。该方法将加氢站作为城市道路网络和城市配电网交互的关键环节, 对系统的各个部分进行了运行优化。优化模型的主要目标是: 1) 将氢能源汽车纳入城市交通系统, 建立了基于城市电网和城市交通系统的时空模型; 2) 优化加氢站的调度, 利用储氢罐的缓冲特性, 稳定电转氢机组并网负荷; 3) 对接入氢能源汽车的城市综合能源系统进行了案例研究以进行优化运行。

## 参考文献

- [1] 滕云, 闫佳佳, 回茜, 等. “无废”电-氢充能服务区多源微网优化运行模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2074-2088, 前插 15.
- [2] 王伟国, 王瑶, 詹华灿. 可再生氢能技术及发展前景[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(7): 186-188+192.
- [3] 窦真兰, 张春雁, 赵慧荣, 等. 含氢能汽车负荷的住宅光-氢耦合能源系统容量优化配置[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 54-65.
- [4] Zhang, J., Li, C., Chen, G. and Dong, Z. (2022) Planning of Hydrogen Refueling Stations in Urban Setting While Considering Hydrogen Redistribution. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **58**, 2898-2908. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3122785>
- [5] Ban, M. et al. (2022) Optimal Scheduling for Integrated Energy-Mobility Systems Based on Renewable-to-Hydrogen Stations and Tank Truck Fleets. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **58**, 2666-2676. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3116117>
- [6] Cao, X.Y., Sun, X.H., Xu, Z.B., Zeng, B. and Guan, X.H. (2022) Hydrogen-Based Networked Microgrids Planning through Two-Stage Stochastic Programming with Mixed-Integer Conic Recourse. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **19**, 3672-3685. <https://doi.org/10.1109/TASE.2021.3130179>
- [7] 张亚超, 郑峰, 舒胜文, 等. 考虑多重不确定性的电-气-交通网络耦合系统数据驱动鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4450-4462, 中插 8.
- [8] 李鹏, 韩建沛, 殷云星, 等. 电转氢作为灵活性资源的微网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019,

---

43(17): 28-35+139.

- [9] Kashem, M.A., Ganapathy, V., Jasmon, G.B., *et al.* (2000) A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks. *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No. 00EX382)*, London, 4-7 April 2000, 251-256.
- [10] 王辉, 梁凌, 李乃慧, 等. 考虑交通流量预测的光-氢-电耦合系统规划[J]. *现代电力*, 2023, 40(x): 1-10.
- [11] El-Taweel, N.A., Khani, H. and Farag, H.E.Z. (2019) Hydrogen Storage Optimal Scheduling for Fuel Supply and Capacity-Based Demand Response Program under Dynamic Hydrogen Pricing, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 4531-4542. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2863247>
- [12] Mu, Y.F., Wu, J.Z., Jenkins, N., Jia, H.J. and Wang, C.S. (2014) A Spatial-Temporal Model for Grid Impact Analysis of Plug-In Electric Vehicles. *Applied Energy*, **114**, 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.006>
- [13] 刘志强, 张谦, 朱熠, 等. 计及车-路-站-网融合的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 36-45.
- [14] Guo, H., Gong, D., Zhang, L., Wang, F. and Du, D. (2023) Hierarchical Game for Low-Carbon Energy and Transportation Systems under Dynamic Hydrogen Pricing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **19**, 2008-2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3190550>