

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201273

考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划

李健强¹, 余光正¹, 汤波¹, 杨秀¹, 夏祥武^{1,2}, 刘婧³, 潘爱强³

(1. 上海电力大学, 上海 200090; 2. 中煤科工集团上海有限公司, 上海 200030;
3. 国网上海市电力科学研究院, 上海 200080)

摘要: 传统多能流综合能源系统往往面临绿色可再生能源装机比例低、利用率低的问题, 同时氢燃料汽车的逐渐普及将增加对氢能的需求, 将电能转化为氢能是满足交通部门潜在氢需求的有效途径。针对风光装机比例低、利用率低和氢能需求的问题, 提出了一种考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划方法。首先, 计及氢能流构建了电/热/冷/氢多能流综合能源系统。其次, 考虑系统年投资费用、运行费用和风光利用率的多目标, 构建双层规划-调度模型, 以电、热、冷、氢等4种形式能量平衡和元件工作特性为约束, 采用非支配性排序遗传算法和商用求解器结合的混合智能算法进行求解。最后, 以某地区实际工业园区为例, 对所提方法进行验证。案例结果分析表明所提出的方法可有效降低系统年总投资成本, 显著提高风光装机比例和利用率, 提高系统运行稳定性和经济性。

关键词: 氢能流; 风光利用率; 多能流综合能源系统; 优化配置; 双层模型

Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow

LI Jianqiang¹, YU Guangzheng¹, TANG Bo¹, YANG Xiu¹, XIA Xiangwu^{1,2}, LIU Jing³, PAN Aiqiang³

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. China Coal Technology & Engineering Group, Shanghai 200030, China; 3. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200080, China)

Abstract: Traditional multi-energy flow integrated energy systems often face the dual problems of low installed capacity and low utilization rate of green renewable energy. The gradual popularization of hydrogen fuel vehicles will result in a large demand for hydrogen energy. The conversion of electrical energy into hydrogen energy is considered an effective way to meet potential hydrogen demand. This paper proposes a planning method for a multi-energy flow integrated energy system that considers wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow. First, for the hydrogen energy flow, an electric/heating/cold/hydrogen integrated energy system is constructed. Secondly, considering the multi-objectives of the system annual investment cost, operating cost and wind and solar utilization rate, this paper constructs a two-level planning-scheduling model. This model takes the energy balance and component operating characteristics of the four forms of electricity/heat/cold/hydrogen as constraints, and uses a non-dominant sequencing hybrid intelligent algorithm combining a genetic algorithm and commercial solver to solve the problem. Finally, it takes an actual industrial park as an example to verify the method proposed. The results show that the method can effectively reduce the total annual investment cost of the system, significantly increase the proportion and utilization of wind and solar installed capacity, and improve the stability and economy of system operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807114) and the Project of Shanghai Science and Technology Commission (No. 18DZ1203200).

Key words: hydrogen energy flow; wind and solar utilization; multi-energy flow integrated energy system; planning; two-level model

0 引言

能源互联网基于互联网和能源的深度融合, 构

建了多能流综合能源系统, 它的出现极大推动了综合能源系统(Integrated Energy System, IES)的发展^[1-3]。多能流综合能源系统打破原来电、热、冷、气、交通等能流子系统相对割裂的状态, 通过多能互补协同效应提升系统的能效和稳定性, 极大地推动了可再生能源的大规模应用, 是解决当前能源和环境问

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807114); 上海市科委项目资助(18DZ1203200)

题的主要途径之一,已成为能源领域的研究热点和前沿^[4-8]。

然而,目前的综合能源系统主要以可再生能源和天然气为燃料的燃气轮机发电为主,在安全经济运行方面存在一些严重问题:1)尽管天然气发电较煤炭和石油更清洁,但还是会排放大量温室气体;2)由于可再生能源的间歇性和波动性,将其直接接入电网会影响电能质量,需借助大规模储能解决;3)目前的储能方式以化学储能为主,其储能寿命期限短、容量小,存在环境污染等问题^[9-12],系统运行灵活性不足,威胁重要工业用户的安全经济运行。上述问题限制了综合能源系统实际工程的发展。氢作为一种特殊的二次能源,具有清洁零污染的特点,国家《能源发展“十三五”规划》已将氢能产业作为未来重点发展的能源之一。随着氢制储技术的发展以及燃料电池汽车的普及^[13-14],氢能的需求越来越大,将其应用在综合能源系统中不仅可以实现大容量和长期存储,而且制成氢气用于交通领域,已获得了相关学者和工业界的广泛关注^[15-16]。本文重点研究了氢制储技术、可再生能源发电技术与冷热电联产技术相结合的含电氢储能系统(Power to Hydrogen Storage System, P2HSS)的多能流综合能源系统(P2HSS-IES)配置问题。

目前已有学者对电制氢技术进行研究。文献[17]建立风氢-混合储能系统(WHMESS)全寿命周期经济性数学模型,考虑以平抑风电波动功率的经济效益和 WHMESS 的稳定运行为约束,对 WHMESS 系统投资回收周期和全寿命周期净利润进行求解。文献[18]建立了温控的电制氢模型,通过调节碱性电解槽的温度输出不同电功率和热功率,可实现主动配电网和区域供热网优化运行。文献[19]提出了利用弃风弃光耦合制氢的方法消纳可再生能源,对制氢设备、燃料电池容量优化配置,但该研究将弃风弃光脱离电网单独考虑,缺乏系统整体性研究,无法进一步提高系统经济性。文献[20]研究了考虑电转氢和可再生能源集成的系统优化配置,其可再生能源集成度通过二氧化碳排放惩罚项体现,虽有效提高了可再生能源装机比例但未考虑风光利用率,仍存在弃风弃光问题。文献[21]研究了在风电系统中加入氢储能,对系统总成本、能量缺失率和系统输出波动量有较好改善,但其只考虑电能量流,与实际情况有所差距。

在有关 IES 的规划研究中,主要考虑经济性、可靠性、环保性等,对传统多能流综合能源系统的设备选择、容量配置和拓扑规划进行研究。文献[22-23]研究了系统储能端电、热储能的优化配置方

法,上述方法是在源端固定情况下对储能元件优化配置,对系统整体性考虑欠缺,提高系统的经济性和环保性程度有限。文献[24]研究了风、光、负荷多状态建模下独立型微网的优化配置,但考虑能量流单一,与实际运行情况相差较大。同时,上述研究中对风光等可再生能源的利用率问题考虑有限。对于传统多能流综合能源系统,可再生能源装机比例的提高会导致多余的电能浪费,降低其利用率。氢能对于可再生能源利用率的提升有显著作用。

综上所述,综合能源系统优化配置研究具有如下问题:1)局限于单纯微网或冷热电联供系统,对多能流综合能源系统中考虑氢能流的优化配置研究不足;2)研究大多在固定源端容量情况下对储能进行优化配置,未从整体性对源端和储能端进行协调规划;3)传统多能流综合能源系统的可再生能源装机比例和利用率仍较低。

针对上述问题,本文提出了一种考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统优化配置方法,在满足电、热、冷、氢等多种形式能源的需求下,建立了考虑年投资费用和运行费用最低,以及风光利用率最高的多目标双层规划-调度模型,并采用非支配性排序遗传算法和商用求解器结合的混合智能算法进行求解。以某地区实际工业园区为例,对本文提出的方法进行验证。案例结果分析表明,所提考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划方法可有效降低系统年总投资成本,显著提高风光装机比例和利用率,提高系统运行稳定性和经济性。

1 P2HSS-IES 构成

本节描述了 P2HSS-IES 的结构,对 P2HSS 进行了详细的数学建模,对于风机、光伏和 CCHP 等设备建模目前研究较多,可参考文献[25-26],本文不再赘述。在本研究中,P2HSS 包括电制氢设备、燃料电池、储氢罐及其相应的辅助设备。

1.1 P2HSS-IES 结构

P2HSS-IES 的架构如图 1 所示,通过各类能源转换设备和通信装置将电热冷气及交通等不同网络集合,系统与外部电网(Electricity Network, EN)和天然气网(Natural Gas Network, NGN)相连。其内部包含了风机(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaic, PV)、冷热电联产系统(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)、电氢储能系统(P2HSS)、电锅炉(Electric Boiler, EB)、电制冷机(Electric Chiller, EC)、热储能装置(Thermal storage Tank, TT)、蓄电池(Storage Battery, SB)等设备构成,并与大电网连接。

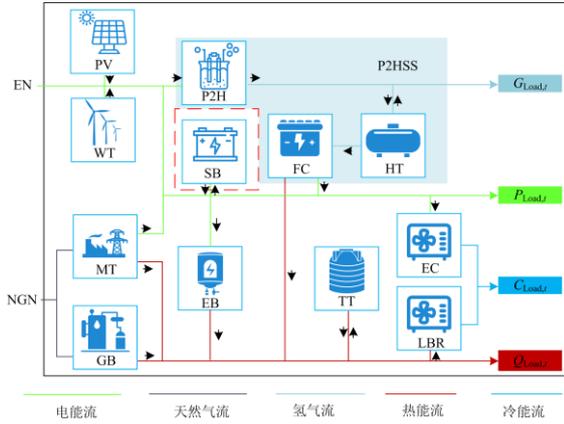


图1 含氢能流的多能流综合能源系统结构

Fig. 1 Multi-energy flow integrated energy system structure containing hydrogen energy flow

其中, P2HSS 系统由电制氢装置(Power to Hydrogen, P2H)、储氢罐(Hydrogen Tank, HT)、燃料电池(Fuel Cells, FC)构成; CCHP 系统由微型燃气轮机(Micro-turbines, MT)、燃气锅炉(Gas-fired Boiler, GB)、溴化锂制冷机(Lithium Bromide Refrigerator, LBR)构成。

在该系统中, 可再生能源装机容量和 P2HSS 系统设备容量是该规划模型的核心优化变量之一, 考虑到各设备投资成本等问题, 需要进行合理的规划以达到最佳的经济性和环保性等。负荷包括除冷、热、电三种类型外, 还考虑了氢气负荷, 主要为氢燃料电池汽车所需的氢气, 由电制氢设备提供。

1.2 P2HSS-IES 结构模型

1.2.1 电制氢模型

目前, 电制氢技术主要有碱液制氢技术、质子交换膜制氢技术和固体氧化物制氢技术等。其中, 碱液制氢技术最为成熟, 已经商业化用于兆瓦级设备的生产和投用, 故本文采用碱液制氢技术进行研究。为方便研究, 本文忽略其热过程, 其数学模型为

$$v_{P2H} = \frac{\eta_{P2H} p_{P2H} \Delta t}{q_{H_2}} \quad (1)$$

式中: v_{P2H} 为 t 时刻电制氢设备生产氢气的速率; η_{P2H} 为电制氢设备生产氢气的效率; p_{P2H} 为 t 时刻电制氢设备消耗的电能; q_{H_2} 为氢气的低位热值。

1.2.2 燃料电池模型

燃料电池的工作原理其实就是电制氢的逆过程, 其数学模型为

$$\begin{cases} P_{FC,t} = \eta_{FC}^e v_{FC} q_{H_2} \Delta t \\ Q_{FC,t} = \eta_{FC}^h v_{FC} q_{H_2} \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{FC,t}$ 、 $Q_{FC,t}$ 分别为 t 时刻燃料电池的发电功率和制热功率; η_{FC}^e 、 η_{FC}^h 分别为燃料电池的电、热转换效率; v_{FC} 为 t 时刻燃料电池氢气消耗速率。

1.2.3 储氢罐模型

对于储氢罐, 其数学模型为

$$S_t^G = S_{t-1}^G + \left[\frac{\eta_{HT}^c v_{HT}^c \rho_{H_2}}{\omega_{HT}} \mu_{HT} + \frac{v_{HT}^{dis} \rho_{H_2}}{\eta_{HT}^{dis} \omega_{HT}} (1 - \mu_{HT}) \right] \Delta t \quad (3)$$

式中: S_t^G 、 S_{t-1}^G 分别表示 t 时刻和 $(t-1)$ 时刻储氢罐的储气状态, 即该时刻储存的氢气与容量的比值; η_{HT}^c 、 η_{HT}^{dis} 分别为储氢罐的储气和放气效率; v_{HT}^c 、 v_{HT}^{dis} 分别为 t 时刻储氢罐充、放氢气的速率; ρ_{H_2} 为氢气密度; ω_{HT} 为储氢罐的容量; μ_{HT} 为 0-1 变量, 1、0 分别为充气状态和放气状态。

2 系统规划模型

2.1 双层优化模型

在含有大量能源转换设备时, 有必要研究 IES 内部的运行对其规划的影响, 建立运行和规划的联合优化^[1], 故本文构建了双层优化模型。其包含两个级别的优化, 内层运行优化嵌套在外层配置优化中, 通过调度方案和规划方案的多次内部迭代, 计算得到双层规划问题的最优解, 优化模型如图 2 所示。

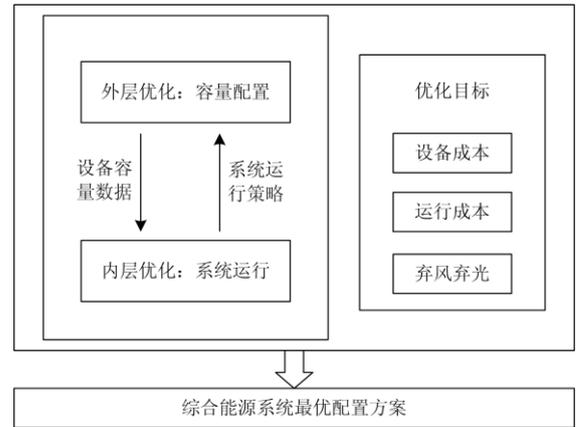


图2 规划-调度双层优化模型

Fig. 2 Planning-scheduling bi-level optimization model

2.2 外层优化问题

2.2.1 目标函数

外层优化模型的决策变量为系统中各设备的配置容量, 目标函数为系统年费用最小, 包括设备投资成本、运行维护费用、购电费用、购气费用、环境费用, 外层优化数学模型为

$$\min C_{total} = C_{inv} + C_{fix} + C_{fuel} + C_{grid} + C_{env} \quad (4)$$

$$C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^N c_i \omega_i \frac{r_0(1+r_0)^{Y_i}}{(1+r_0)^{Y_i} - 1} \quad (5)$$

$$C_{\text{fix}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{\text{fix},i} P_{i,t} \Delta t \quad (6)$$

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{MT},t} \Delta t}{v_{\text{LHV}}} C_{\text{gas}} \quad (7)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T e_{\text{buy},t} P_{\text{buy},t} \Delta t \quad (8)$$

$$C_{\text{env}} = \sum_{t=1}^T \sum_{u=1}^{N_u} [R_u (k_u^{\text{MT}} \frac{P_{\text{MT},t}}{\eta_{\text{MT}}} + k_u^{\text{GB}} \frac{Q_{\text{GB},t}}{\eta_{\text{GB}}} + k_u^{\text{grid}} \frac{P_{\text{Grid},t}}{\eta_{\text{grid}}}) \Delta t - R_{\text{FCEV}}] \quad (9)$$

$$R_{\text{FCEV}} = \frac{E_{\text{TRA}}}{\eta_{\text{FCEV}}} G_{\text{Load},t} (\lambda_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{CO}_2}) \quad (10)$$

式中： C_{total} 、 C_{inv} 、 C_{fix} 、 C_{grid} 、 C_{gas} 、 C_{env} 分别为年费用、设备等年值投资费用、运行维护、购电费用、购气费用以及环境费用； N 为设备种类； T 为规划总时段数，为8760h； I 为设备集，包括WT、PV、EB、EC、HS、MT、GB、LBR、P2H、HT、FC； c_i 为第*i*类设备的单位容量初始投资成本； r_0 为贴现率，取值6.7%； Y_i 为第*i*类设备的全寿命周期； $c_{\text{fix},i}$ 为第*i*类设备的单位功率维护成本； $P_{i,t}$ 为第*i*类设备在*t*时刻的出力； $Q_{i,t}$ 为第*i*类设备在*t*时刻的热出力； $C_{i,t}$ 为第*i*类设备在*t*时刻的冷出力； C_{gas} 为天然气价格，取值3.3元/m³； v_{LHV} 为天然气的低位热值； $e_{\text{buy},t}$ 为*t*时刻大电网的购电价格； $P_{\text{buy},t}$ 为*t*时刻从电网的购电量； N_u 为污染物种类数，包括CO₂、SO₂、NO_x等； R_u 为污染物*u*的环境价值； k_u^{MT} 、 k_u^{GB} 分别为微燃机、燃气锅炉出力时污染物*u*的排放强度； k_u^{grid} 为所购电能的火力发电厂出力时污染物*u*的排放强度； R_{FCEV} 为氢燃料电池汽车环境效益^[19]； E_{TRA} 为汽油车每千米所排放的等量温室气体； η_{FCEV} 为氢燃料电池汽车每千米的耗氢量； $G_{\text{load},t}$ 为*t*时刻的氢气负荷。

2.2.2 约束条件

外层优化的约束条件主要考虑保证系统正常运行所需的最低容量以及设备的占地面积。

$$\omega_{i,\min} \leq \omega_i \leq \omega_{i,\max} \quad i \in I \quad (11)$$

式中： ω_i 为各类设备的配置容量； $\omega_{i,\min}$ 为保证系统正常运行的最低容量约束； $\omega_{i,\max}$ 为考虑占地面积的最大容量约束。

2.3 内层优化问题

2.3.1 目标函数

在外层优化确定了设备容量的基础上，内层优化为系统功率分配问题。风机、光伏、CCHP、P2HSS、电网、电锅炉、电制冷机出力为内层优化问题的决策变量，目标函数为年运行成本最低和风光利用率最高。

$$\begin{cases} \min C_{\text{op}} = C_{\text{fix}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{grid}} + C_{\text{env}} \\ f = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t})}{\sum_{t=1}^T (P_{\text{WT},t,\max} + P_{\text{PV},t,\max})} \end{cases} \quad (12)$$

式中： C_{op} 、 f 分别为系统年运行费用和风光利用率； $P_{\text{WT},t,\max}$ 、 $P_{\text{PV},t,\max}$ 分别为*t*时刻的风电、光伏预测最大出力； $P_{\text{WT},t}$ 、 $P_{\text{PV},t}$ 分别为*t*时刻风光实际出力。

2.3.2 约束条件

内层优化的约束条件主要考虑电、热、冷、氢4种形式能量平衡、设备出力约束以及储能设备约束。

1) 功率平衡约束

为了保证综合能源系统的可靠运行，系统必须满足电、热、气供需平衡。根据第1节提出的系统结构，系统必须满足式(13)~式(16)的功率平衡方程。

$$P_{\text{Grid},t} + P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{FC},t} + P_{\text{MT},t} = \quad (13)$$

$$P_{\text{Load},t} + P_{\text{EB},t} + P_{\text{EC},t} + P_{\text{P2H},t}$$

$$Q_{\text{MT},t} + Q_{\text{GB},t} + Q_{\text{FC},t} + Q_{\text{EB},t} + q_{\text{TT}}^{\text{c}} + q_{\text{TT}}^{\text{dis}} = Q_{\text{Load},t} + Q_{\text{LBR},t} \quad (14)$$

$$C_{\text{LBR},t} + C_{\text{EC},t} = C_{\text{Load},t} \quad (15)$$

$$v_{\text{P2H}} + v_{\text{HT}}^{\text{c}} + v_{\text{HT}}^{\text{dis}} = G_{\text{Load},t} + v_{\text{FC}} \quad (16)$$

式中： $P_{\text{Load},t}$ 、 $Q_{\text{Load},t}$ 、 $C_{\text{Load},t}$ 和 $G_{\text{Load},t}$ 分别为*t*时刻的电负荷、热负荷、冷负荷和氢气负荷； q_{TT}^{c} 、 $q_{\text{TT}}^{\text{dis}}$ 分别为*t*时刻储热罐充、放热的功率。

2) 设备出力约束

除了满足上述列出的功率平衡等式约束外，系统内各设备的电、热和气出力也需满足其正常工作范围的上下限要求。

$$P_{m,t,\min} \leq P_{m,t} \leq P_{m,t,\max} \quad (17)$$

$$Q_{n,t,\min} \leq Q_{n,t} \leq Q_{n,t,\max} \quad (18)$$

$$C_{r,t,\min} \leq C_{r,t} \leq C_{r,t,\max} \quad (19)$$

$$G_{s,t,\min} \leq G_{s,t} \leq G_{s,t,\max} \quad (20)$$

式中： $P_{m,t,\min}$ 、 $P_{m,t,\max}$ 、 $P_{m,t}$ 分别为任意*m*类电设备在*t*时刻正常运行时的最小、最大电功率和实际

发电功率; $Q_{n,t,\min}$ 、 $Q_{n,t,\max}$ 、 $Q_{n,t}$ 分别为任意 n 类热设备在 t 时刻正常运行时的最小、最大热功率和实际发热功率; $C_{r,t,\min}$ 、 $C_{r,t,\max}$ 、 $C_{r,t}$ 分别为任意 r 类冷设备在 t 时刻正常运行时的最小、最大冷功率和实际供冷功率; $G_{s,t,\max}$ 、 $G_{s,t,\min}$ 、 $G_{s,t}$ 为电制氢设备在 t 时刻生产氢气的上下限和实际电功率。

3) 储能设备约束

储能装置包括储氢罐、热储能装置, 应同时满足储能额定容量与交换功率约束, 本文以储氢罐为例。

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\omega_{HT}\Delta t}{\rho_{H_2}\eta_{HT}^c} \leq v_{HT}^c \leq 0 \\ 0 \leq v_{HT}^{dis} \leq \frac{\omega_{HT}\eta_{HT}^{dis}\Delta t}{\rho_{H_2}} \\ S_{min}^G \leq S_t^G = S_{t-1}^G + \left[\frac{\eta_{HT}^c v_{HT}^c \rho_{H_2}}{\omega_{HT}} \mu_{HT} + \frac{v_{HT}^{dis} \rho_{H_2}}{\eta_{HT}^{dis} \omega_{HT}} (1 - \mu_{HT}) \right] \Delta t \leq S_{max}^G \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\omega_{TT}\Delta t}{\eta_{TT}^c} \leq q_{TT}^c \leq 0 \\ 0 \leq q_{TT}^{dis} \leq \omega_{TT}\eta_{TT}^{dis}\Delta t \\ S_{min}^H \leq S_t^H = S_{t-1}^H + \left[\frac{\eta_{TT}^c q_{TT}^c}{\omega_{TT}} \mu_{TT} + \frac{q_{TT}^{dis}}{\eta_{TT}^{dis} \omega_{TT}} (1 - \mu_{TT}) \right] \Delta t \leq S_{max}^H \end{array} \right. \quad (22)$$

式中: S_{max}^G 、 S_{min}^G 、 S_{max}^H 、 S_{min}^H 分别为储氢罐、储热器的储能状态上下限; η_{TT}^c 、 η_{TT}^{dis} 分别为储热罐的储热和放热效率; μ_{TT} 为 0-1 变量, 1、0 分别为充热状态和放热状态。

3 求解方法

综合能源系统优化配置是一个多目标、多约束条件的线性整数规划问题, 常用的求解方法有各种智能算法或 GAMS、Cplex 等软件。在多目标优化算法领域, 文献[27]对非支配遗传算法的性能同一些传统的多目标算法的性能进行了对比分析, 并得出满意的 NSGA-II 算法的优化结果[27]。故本文采用 NSGA-II 和商业高效求解器 Cplex 相结合的混合智能算法, 在 Matlab 中进行编程, 具体流程如图 3 所示。首先, 在决策变量的优化范围内生成外层规划层的初始种群, 将随机生成的种群个体代入内层规划中, 通过 Cplex 求解器, 计算出外层目标函数值,

并对种群进行精英保留策略和快速非支配排序后, 进行遗传操作得到第一代子种群; 然后, 从第二代开始, 将父代种群与子代种群合并, 进行快速非支配排序, 同时对每个非支配层中的个体进行拥挤度计算, 根据非支配关系以及个体的拥挤度选取合适的个体组成新的父代种群; 最后, 通过遗传算法的基本操作产生新的子代种群。依此类推, 直到满足程序结束的条件, 输出结果。

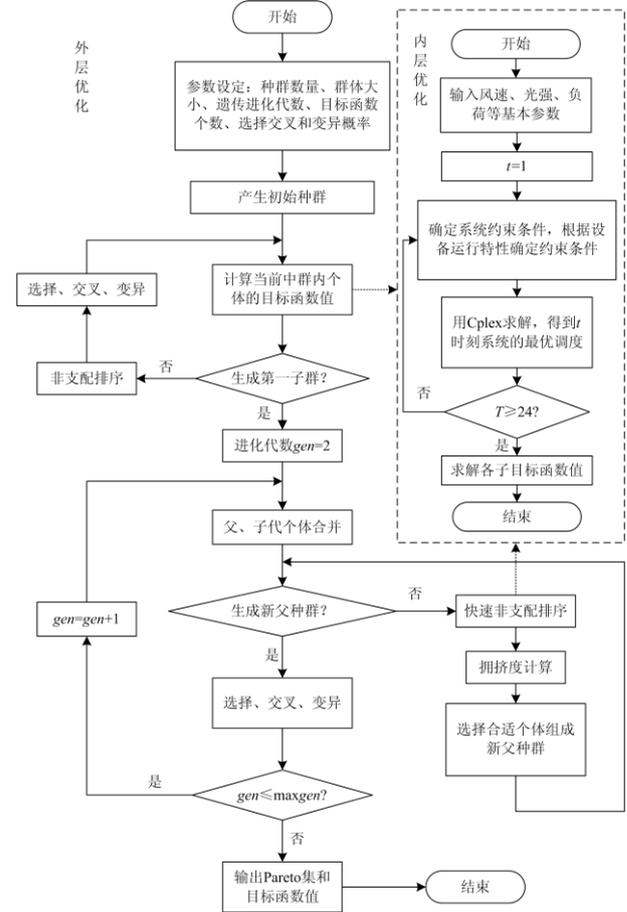


图 3 优化流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization

4 算例仿真分析

4.1 基础数据与场景设置

为验证本文所提系统的合理性, 以某地区实际工业园区为例进行计算分析, 园区内包含电/热/冷负荷, 以及氢燃料电池汽车需要的氢气负荷, 电/热/冷/氢日最大负荷分别为 943 kW、534 kW、577 kW 和 29.2 kg。考虑占地面积等因素, 园区内风机/光伏最大安装容量为 1 600 kW 和 1 600 kW, 与电网交互的最大功率为 1 000 kW。本文为减少计算量, 根据该区域所在地区及天气等特点, 将全年

划分为冬季、夏季、过渡季，并分别选取典型日进行 24 h 优化调度，各季分别按 92、92、181 天计算，典型日风光预测最大出力和电/热/冷/氢负荷的曲线如图 4、图 5 所示。

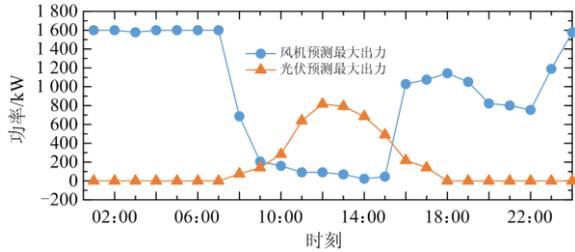


图 4 典型日风光预测最大出力曲线图

Fig. 4 Maximum output curve of typical day scenery forecast

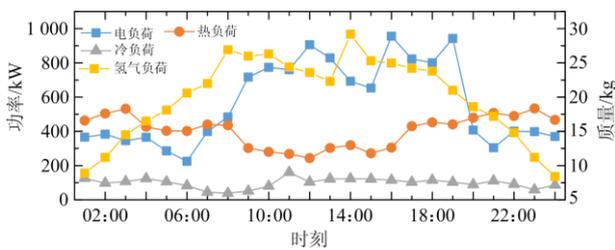


图 5 典型日电/热/冷/氢负荷曲线图

Fig. 5 Typical daily electricity/heat/cold/hydrogen load curve

本文设置 5 个场景进行对比分析。

场景 1: 传统供能方式，由配电网供电、燃气锅炉供热、电制冷机供冷。

场景 2: 冷热电联供方式，即微燃机供电、电制冷机和溴化锂制冷机同时供冷，配电网、电锅炉、燃气锅炉和热储能同时供热。

场景 3: 在场景 2 的基础上加入风电/光伏。

场景 4: 在场景 3 的基础上加入蓄电池储能。

场景 5: 在场景 4 的基础上加入 P2HSS，并舍去蓄电池。

为选取到最优的结果，本文作出如下假设^[1]：

- (1) 系统各设备的可选容量为连续的；
- (2) 在各自的运行范围内，各设备的运行效率为定值，不随负荷率的改变而改变，且忽略启停及变工况时间。

4.2 优化配置结果分析

4.2.1 经济性对比

采用本文所提的规划方法，对上述四种场景进行求解，其结果如表 1 所示，各场景的目标函数值如表 2 所示。

对比场景 1 和场景 2，场景 2 考虑冷热电联供，系统多了微燃机、溴化锂制冷机和储热器等辅助设备，使其初始投资费用和购气费用有所提高，分别

为 12.65 万元和 26.51 万元，但其运行维护费用、购电费用、环境费用均有明显下降，分别为 13.82 万元、111.07 万元和 115.61 万元，致其总费用较场景 1 减少 201.34 万元，约 22.99%。这是由于在场景 2 中加入微燃机和溴化锂制冷机等设备，使得系统购气费用有所增加，但是通过燃烧天然气产生的电能和热能满足了园区内部分负荷需求，使得电制冷机和燃气锅炉的供能需求下降，从而降低了购电需求，且由购电产生的环境费用也有所降低。

对比场景 2 和场景 3，由于风机和光伏的加入，场景 3 的初始投资费用增加了 183.32 万元，运行维护费用、购电费用、购气费用和环境费用大幅下降，分别减少 15.61 万元、224.50 万元、54.09 万元和 172.99 万元，其总费用较场景 2 减少 283.88 万元，约 42.09%。这是由于可再生能源的加入，满足了大部分的负荷需求，导致其向电网购买的电量大幅下降，由燃煤发电带来的环境污染费用也大幅降低。但是其余设备的容量需求较高，这是因为大量的可再生能源接入后，其发电波动性得到放大，需要足够的备用来满足某一时刻的高负荷需求。

表 1 不同场景下功能设备优化配置结果

Table 1 Optimized configuration results of functional equipment in different scenarios

设备	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
WT/kW	—	—	1 100	1 290	1 530
PV/kW	—	—	1 120	1 180	1 600
EB/kW	—	520	710	650	260
EC/kW	640	280	650	640	250
HS/kW	—	320	860	830	750
MT/kW	—	320	410	320	300
GB/kW	650	450	430	330	0
LBR/kW	—	350	620	580	330
P2H/kW	—	—	—	—	1 000
HT/kg	—	—	—	—	800
FC/kW	—	—	—	—	300
SB/kW	—	—	—	1 780	—

表 2 系统最优配置目标值和参数

Table 2 System optimal configuration target values and parameters

目标函数	场景				
	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
初始投资费用/万元	58.11	70.76	254.08	283.89	302.50
运行维护费用/万元	38.45	24.63	9.02	14.65	25.13
购电费用/万元	357.38	246.31	21.81	19.83	23.59
购气费用/万元	114.37	140.88	86.79	60.76	30.55
环境费用/万元	307.48	191.87	18.88	13.68	3.34
总费用/万元	875.80	674.46	390.58	392.81	385.10
风光利用率/%	—	—	50.30	60.59	89.36

对比场景 3 和场景 4, 风机和光伏的装机容量分别增加了 190 kW 和 60 kW, 而消耗天然气的微燃机和燃气锅炉容量分别下降了 90 kW 和 100 kW, 其初始投资费用仍增加 29.81 万元。此外, 运行维护费用增加了 5.63 万元, 购电费用、购气费用和环境费用分别减少 1.98 万元、26.03 万元和 5.20 万元, 其总费用较场景 3 增加了 2.23 万元, 约 0.57%。这是由于蓄电池的加入, 系统拥有了削峰填谷的能力, 使可再生能源的装机比例有所上升, 但负荷需求不变, 限制其上升效果。由于上述电源设备容量改变, 系统购电、购气费用下降, 其环境费用也随之降低。

对比场景 4 和场景 5, 由于场景 5 中用电制氢、储氢罐和燃料电池等设备代替蓄电池, 其初始投资费用和运行维护费用较场景 4 有所提高, 分别增加了 18.61 万元和 10.65 万元, 购电费用也增加了 3.76 万元; 但购气费用和环境费用明显下降, 分别减少 30.21 万元和 10.34 万元。场景 5 中购气量减少带来的收益大于增加设备所需的投资费用, 因此其总费用较场景 4 减少 7.71 万元。场景 5 中考虑氢能流, 增加了电负荷, 使风机和光伏装机容量分别增加 240 kW 和 420 kW; 燃料电池在供电的同时供热, 使得电锅炉和燃气锅炉的容量显著下降。

4.2.2 P2HSS 对风光利用率影响

在场景 3、场景 4 和场景 5 中, 系统加入了风光发电, 其在冬季典型日内各时刻的风光利用率如图 6 所示。

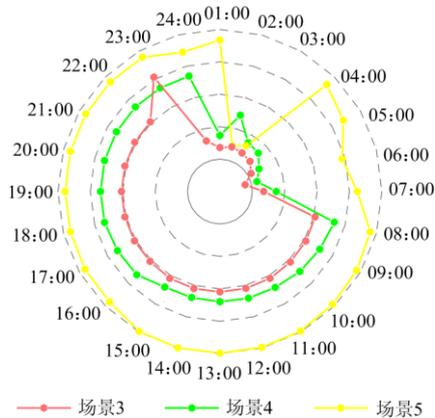


图 6 冬季典型日内各时刻的风光利用率图

Fig. 6 Scenery utilization rate diagram at various moments in a typical winter day

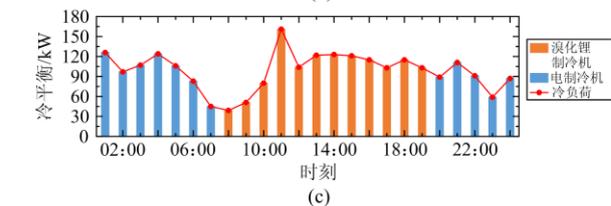
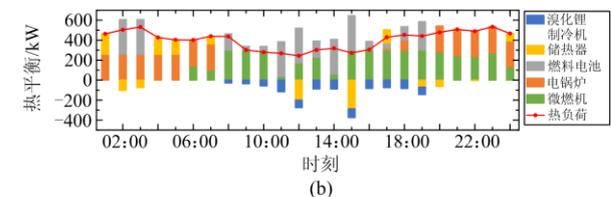
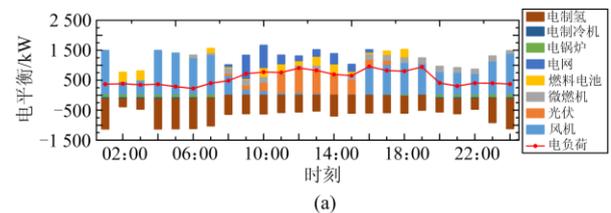
从图 6 可以看出, 在 08:00—22:00 时段, 场景 3 的风光利用率稳定在 0.60~0.65, 其弃风弃光问题严重; 场景 4 的风光利用率稳定在 0.70~0.80, 其弃风弃光问题由于蓄电池的加入有所改善, 而场景 5 的风光利用率达到了 0.90~1.00, 提高了 30% 以上,

基本解决风光消纳问题。分析得到, 由于场景 5 考虑了氢气负荷, 其用电需求大幅提升, 因此其风光装机容量较场景 3 分别增加了 430 kW 和 480 kW, 可再生能源的装机比例提高; 同时由于 P2HSS 加入, 进一步提高场景 5 的风光利用率。

在 22:00—08:00 时段, 三个场景的风光利用率都存在明显的波动。场景 3 的风光利用率降到 40% 以下, 这是因为在该时间段内系统负荷开始降低, 而夜间风速较高, 风机发电量较大, 导致风光利用率降低。场景 3 在 23:00 时刻的风光利用率达到峰值 79.46%, 这是因为该时刻风机出力增加, 而电负荷开始下降, 其电负荷基本可由风机实现供电。场景 4 在这一时段内变化趋势同场景 3, 数值较前者均增加 0.5% 及以上, 说明蓄电池可改善弃风弃光问题, 但受限于容量不能作用不明显。场景 5 在 23:00—01:00 时段仍有较高风光利用率, 由于电负荷下降外, 储氢罐还要补充氢气储能; 在 02:00—03:00 时段风光利用率下降至 40%, 这是由于储氢罐储能容量达到峰值, 而氢负荷和电负荷都较低, 大量电能无法利用; 在 04:00—07:00 时段风光利用率在 78%~89% 波动, 相对于其余时刻略有降低, 这是由于该时段内负荷处于增长阶段, 但仍未达到较高值, 存在部分浪费。

4.2.3 P2HSS 能力分析

为了进一步阐明 P2HSS 在多能流综合能源系统中提高风光利用率的作用, 以冬季典型日为例进行分析, 图 7 给出了各时刻电、热、冷、氢气的调度情况, 图 8 给出了各时刻 P2HSS 内三个设备的工作状态。



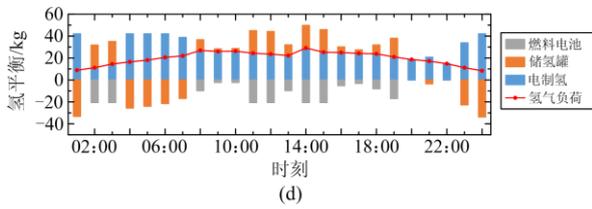


图7 冬季典型日逐时电、热、冷、氢气调度情况图
Fig. 7 Hour-by-hour electricity, heat, cold, and hydrogen dispatch on typical winter days

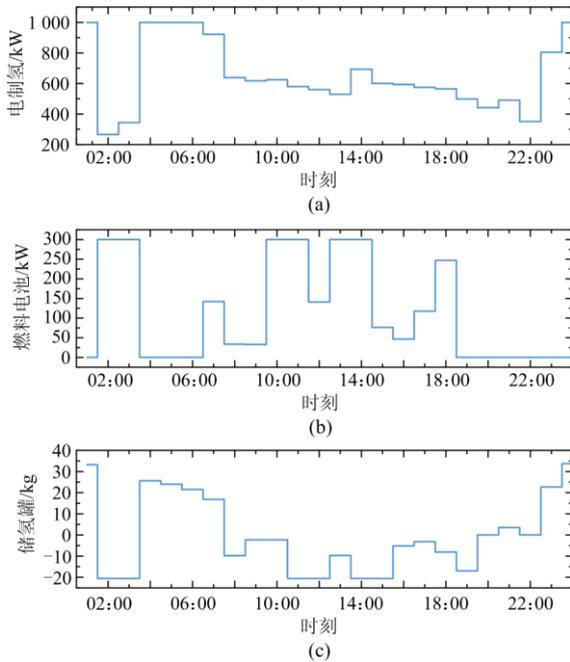


图8 冬季典型日 P2HSS 工作状态

Fig. 8 Winter typical day P2HSS working status

由图7可知，园区内冬季典型日主要由风机和光伏提供电负荷和电制氢等设备的电需求。在21:00—07:00时段，此时光伏不发电，微燃机发电较少，风机在较快的风速下发出大量电能，总体发电量远大于电负荷，此时电制氢设备吸收多余电能转化为氢气，除了供给氢燃料电池汽车外，将剩余氢气储存在储氢罐中，实现风电消纳。在08:00—20:00时段，此时为电负荷高峰期，风速下降导致风机出力降低，尽管光伏发电但仍无法满足园区内电需求，则微燃机出力增加，同时燃料电池消耗储氢罐中的氢气提供电能，如若不满足则需向电网购买电能。

对于园区内冬季典型日各时刻热、冷功率平衡，微燃机、电锅炉、燃料电池和储热器共同满足园区内的热负荷和溴化锂制冷机的冷负荷需求，电制冷机和溴化锂制冷机共同满足园区内冷负荷的需求。

在白天电负荷高峰期，微燃机出力较大，其产生的热能与燃料电池产生的热能配合即可满足园区内的热负荷需求；在夜间电负荷低谷时段，微燃机出力减少，其热能也相应减少，此时电能相对较多，园区内缺少的热负荷需求由电锅炉提供；此外，储热器在典型日内吸收多余的热能，在热功率不足时向园区内释放热能，实现热能的高效利用。在白天时段，冷能主要由溴化锂制冷机将热能转换为冷能提供；在夜间时段，由电制冷机提供冷能需求。

对于园区内冬季典型日各时刻的氢气平衡，电制氢设备制氢提供园区内的氢气需求，储氢罐协同配合提高风光利用率，并降低运行成本。在08:00—20:00时段，电制氢生产的氢气全部提供给氢气负荷，此时为电负荷高峰期，储氢罐释放氢气提供给燃料电池供电；在21:00—07:00时段，电制氢产生的氢气超出氢气负荷，此时将多余的氢气储存在储氢罐当中，实现了电负荷的转移，起到削峰填谷的作用。

以冬季典型日为例分析 P2HSS 的运行情况如图8所示。从图中可以看出，电制氢在03:00—07:00和23:00—01:00时段功率突增，此时电制氢设备除了提供负荷氢气外，还向储氢罐内充氢(如图8(c)所示，充氢为正，放氢为负)。在这两个时间段对应的是谷电价时刻，说明电制氢的工作状态与电价相关。储存的氢气在峰电价或者电负荷较大的10:00—22:00时段，释放氢气给燃料电池发电。P2HSS系统的工作基本为高峰负荷和谷平电价时间，起到削峰填谷的作用，缓解用电高峰的同时保证了系统的经济性。

5 结论

本文提出了一种考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划方法，建立了考虑年投资费用和运行费用最低，以及风光利用率最高的多目标双层规划-调度模型，以电、热、冷、氢等4种形式能量平衡和元件工作特性为约束，采用非支配性排序遗传算法和商用求解器结合的混合智能算法进行求解，得到系统各设备的最优容量配置和电、热、冷、氢的优化调度策略。通过对比不同场景下的优化配置结果，验证了本文所提方法的经济性和可行性。结果表明，该系统有效降低了系统购电成本和购气成本，极大减少了污染物的排放。此外，氢能流的加入提高了风光的装机容量，达到了40%，同时提高风光利用率达到了89.36%，提高了100%以上。

本文提出的配置模型使园区内各项性能指标

有所改善, 实现了电/热/冷/氢气的多能流协调互补规划。但是这只是针对一个独立园区进行的规划, 且没有考虑氢能的跨季节储能作用和多个园区之间的互补规划, 这是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 任娜, 王雅倩, 徐宗磊, 等. 多能流分布式综合能源系统容量匹配优化与调度研究[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3504-3512.
REN Na, WANG Yaqian, XU Zonglei, et al. Component sizing and optimal scheduling for distributed multi-energy system[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3504-3512.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 卫志农. 能源战略与能源互联网[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 537-538.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WEI Zhihong. Energy strategy and energy internet[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 537-538.
- [3] 蒋诗百, 杨丽娜, 刘权, 等. 考虑柔性负荷的能源互联网型园区综合能源优化研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 83-88.
JIANG Shibai, YANG Lina, LIU Quan, et al. Research on comprehensive energy optimization of energy interconnected parks considering flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 83-88.
- [4] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Shaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [5] 殷爽睿, 艾芊, 曾顺奇, 等. 能源互联网多能分布式优化研究挑战与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1359-1369.
YIN Shuangrui, AI Qian, ZENG Shunqi, et al. Challenges and prospects of multi-energy distributed optimization for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1359-1369.
- [6] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 179-186.
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 179-186.
- [7] 降国俊, 崔双喜, 樊小朝, 等. 计及综合需求侧响应的电-气综合能源系统协调优化运行[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 43-49.
JIANG Guojun, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, et al. Coordinated and optimal operation of electric-gas integrated energy system considering integrated demand side response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 43-49.
- [8] 古哲源, 苏小林, 秦宏, 等. 考虑广义电储能的综合能源系统多目标规划[J]. 供用电, 2020, 37(7): 73-80, 87.
GU Zheyuan, SU Xiaolin, QIN Hong, et al. Multi-objective planning of integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 73-80, 87.
- [9] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 168-178.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 168-178.
- [10] SAMSATLI S, STAFFELL I, SAMSATLI N. Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(1): 447-475.
- [11] 董慧峰, 李文启, 牛文迪, 等. 电池储能系统参与电网削峰填谷实用算法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 74-78.
DONG Hui Feng, LI Wenqi, NIU Wendi, et al. Practical algorithm applied in peak load shifting of battery energy storage system in power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(18): 74-78.
- [12] 傅旭, 李富春, 杨攀峰. 基于全生命周期的各类储能调峰效益比较[J]. 供用电, 2020, 37(7): 88-93, 43.
FU Xu, LI Fuchun, YANG Panfeng. Benefits comparison of various energy storage equipment peak regulation based on the whole life cycle[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 88-93, 43.
- [13] LYNCH M, DEVINE M, BERTSCH V. The role of power-to-gas in the future energy system: market and portfolio effects[J]. Energy, 2019, 185: 1197-1209.
- [14] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [15] 蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 127-135.
CAI Guowei, KONG Lingguo, XUE Yu, et al. Overview of research on wind power coupled with hydrogen production technology[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2014, 38(21): 127-135.
- [16] 彭生江, 杨淑霞, 袁铁江, 等. 广义风-氢-煤能源系统的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 6-12.
PENG Shengjiang, YANG Shuxia, YUAN Tiejiang, et al. Challenges and prospects of generalized wind-hydrogen-coal energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 6-12.
- [17] 王战栋, 陈洁, 张保明, 等. 风氢-混合储能系统全生命周期经济性研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 66-73.
WANG Zhandong, CHEN Jie, ZHANG Baoming, et al. A study on life cycle economics of wind hydrogen-mixed energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 66-73.
- [18] LI Jiarong, JIN Lin, SONG Yonghua, et al. Operation optimization of power to hydrogen and heat (p2h) in ADN coordinated with the district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1672-1683.
- [19] 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
KONG Lingguo. Research on optimal sizing and coordinated control strategy of integrated energy system of wind photovoltaic and hydrogen[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [20] 刘维康, 王丹, 余晓丹, 等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 11-20.
LIU Weikang, WANG Dan, YU Xiaodan, et al. Multi-objective planning of micro energy network considering P2G-based storage system and renewable energy integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 11-20.
- [21] 赵军超, 陈洁, 马小晶, 等. 计及调度计划与经济性的风/氢系统储能容量优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(24): 94-99.
ZHAO Junchao, CHEN Jie, MA Xiaojing, et al. Energy storage capacity optimization for wind power/hydrogen system considering dispatching program and economy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(24): 94-99.
- [22] 杨锡运, 张璜, 修晓青, 等. 基于商业园区源/储/荷协同运行的储能系统多目标优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3996-4003.
YANG Xiyun, ZHANG Huang, XIU Xiaoqing, et al. Multi-objective optimal configuration of energy storage systems based on coordinated operation of source/storage/load in commercial park[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3996-4003.
- [23] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.
- [24] 余金龙, 赵文会, 赵波, 等. 基于多状态建模的独立型微网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 11-17.
YU Jinlong, ZHAO Wenhui, ZHAO Bo, et al. Optimal configuration of standalone microgrid based on multistable modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 11-17.
- [25] 徐青山, 李淋, 蔡霖霖, 等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 36-44.
XU Qingshan, LI Lin, CAI Jilin, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 36-44.
- [26] 李珂, 邵能灵, 张沈习, 等. 考虑相关性的分布式电源多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 51-57, 199.
LI Ke, TAI Nengling, ZHANG Shenxi, et al. Multi-objective planning method of distributed generators considering correlations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 51-57, 199.
- [27] SHENG Wanxing, LIU Keyan, LIU Yuan, et al. Optimal placement and sizing of distributed generation via an improved nondominated sorting genetic algorithm II[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 569-578.

收稿日期: 2020-10-22; 修回日期: 2020-12-20

作者简介:

李健强(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多能流综合能源系统优化配置。E-mail: lijianqiang866@126.com

(编辑 许威)