

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.06.007

典型综合能源系统建模及特性仿真研究

Research on modeling and characteristic simulation of a typical integrated energy system

韩朝兵¹, 汤冰², 尹瑞麟³, 朱正香⁴, 薛明华¹, 祝建飞¹, 艾春美¹, 孙立^{3*}
HAN Chaobing¹, TANG Bing², YIN Ruilin³, ZHU Zhengxiang⁴, XUE Minghua¹,
ZHU Jianfei¹, AI Chunmei¹, SUN Li^{3*}

(1.上海明华电力科技有限公司, 上海 200090; 2.航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106; 3.东南大学能源与环境学院, 南京 210018; 4.上海上电漕泾发电有限公司, 上海 201507)

(1.Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Company Limited, Shanghai 200090, China; 2.AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China; 3.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210018, China; 4.Shanghai Shangdian Caojing Power Generation Company Limited, Shanghai 201507, China)

摘要:建立了综合能源系统中光伏光热设备、燃料电池和电解槽、吸收式制冷机和空气源热泵、储热罐和储氢罐等的机理模型,并给出了设备能量平衡约束。根据不同设备的效率、启停速度等实际情况,分别对热设备和电设备制定了管理和调度策略。结合3种不同的应用场景,在能量平衡约束下,根据制定的规则,测试了在不同场景中的系统运行情况,即在可再生能源发电充足的情况下,针对负荷侧电量消纳进行分配,展示了系统的储能调度过程;在可再生能源发电不足的情况下,针对源侧的出力方式进行分配,展示系统的供电供热调度过程。最后针对锂电池电量充满或者放尽的情况进行了仿真,阐述了燃料电池和电解水制氢系统对电能大规模供给和大容量消纳的影响。研究成果可为综合能源系统调度管理提供借鉴和参考。

关键词:综合能源系统;建模;特性仿真;调度管理策略;典型场景;燃料电池;电解槽;空气源热泵;储能;可再生能源

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)06-0049-10

Abstract: The mechanism models of the photovoltaic and photothermal equipment, fuel cells and electrolytic cells, absorption refrigerator and air source heat pump, heat storage tank and hydrogen storage tank in an integrated energy system are established, and the constraints of energy balance in different equipment are given. According to the equipment actual conditions such as its efficiency and start-up/shutdown speed, different management and scheduling strategies are formulated, respectively. Under the constraints of energy balance, the system was tested in three different scenarios in comply with the proposed strategies. The three operation scenarios are distributing the renewable energy on load side to the energy storage system when it is excessive, and scheduling the heat and power supply mode on source side when renewable energy generation is insufficient. A simulation was carried out on the fully charged or discharged lithium batteries, and large-scale power supply and large-capacity power consumption made by fuel cells and water electrolysis were expounded. The research results can provide reference for dispatching management of integrated energy systems.

Keywords: integrated energy system; modeling; characteristic simulation; dispatching management strategy; typical scenario; fuel cell; electrolyzer; air source heat pump; energy storage; renewable energy

0 引言

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是一种“电源、电网、负荷、储能”(源-网-储-荷)整

体协调运行系统,是中国乃至世界重要能源发展方向,是解决当前能源问题的有效途径之一^[1-4]。典型的IES主要由气热冷电储能装置、电制热/冷设备、冷热电联供设备、热交换器、电解水制氢、燃料电池等组成。IES可以提高能源利用效率,实现可再生能源规模化开发和能源梯级利用,提高经济社会能源供用的灵活性与安全性。作为一种新型一体化能源系统,IES的发展对于破解世界所面临的能源

基金项目:国家电力投资集团科技研究项目(SH201812)
Science and Technology Research Project of State Power Investment Group (SH201812)

需求激增、污染日趋严重等问题具有重要意义。

当前,研究者针对综合能源系统仿真、规划、调度与运行优化开展了大量的研究^[5-7]。王成山等^[8]围绕综合能源系统数字孪生在系统规划、运行、控制以及与城市多领域协同交互等方面进行了分析、探讨和展望。张淑婷等^[9]针对工业园区综合能源系统开展了建模,结合系统储能特性,提出了日前运行优化调度模型,并综合考虑了供能管网和储能水罐储能特性及其对经济效益的影响。白雪婷等^[10]以工业园区综合能源系统为研究对象,提出了一种考虑综合需求响应的优化调度模型,并通过实例分析验证所提模型在运行成本、消纳新能源以及“削峰填谷”等方面的优势。Li 等^[11]提出了一种针对包含储能的园区级 IES 的优化调度算法,并联合使用遗传算法和动态规划完成仿真求解。然而,现有研究主要采用理论建模方法,缺乏统一的通用式仿真平台,同时多能流复杂应用场景的出现也对仿真平台的适应性提出了更高要求。

综合现有研究进展来看,典型的综合能源系统仿真平台对于系统特性分析、优化设计和调度规划具有支撑作用,通过仿真系统数字镜像模拟真实的系统运行,是理论和应用研究中不可缺少的步骤,因此有必要开展这方面的研究。

本文基于一套包含多种能源的综合能源管控系统,分析了在不同应用场景下,源侧设备和负荷侧设备的能量产、储策略。从设备机理及系统耦合 2 个层面建立了包含光伏发电、氢燃料电池、电解槽、空气源热泵、吸收式制冷机等多种能源设备的综合能源仿真平台。研究了基于规则的冷热氢电

能源管理系统,通过策略分配对 IES 的产电耗电、产热耗热、产氢耗氢等设备进行管理,实现不同工况下系统的能源平衡和能源高效安全利用。

1 IES 系统模型

1.1 系统结构

针对未来城市中绿色智慧建筑的需求,研究综合多种可再生能源、储能技术、热泵、氢能循环利用的多元供能系统。

本文构建的 IES 所包含的设备及其相互间的能量流动关系如图 1 所示,图中 DC 为直流电,AC 为交流电。基于 Simscape 模块搭建的 IES 仿真模型如图 2 所示。总系统可划分为电、热、冷 3 个子系统,且在电子系统中包含对氢能的生产及利用。在不同子系统之间,通过能量转换设备,如空气源热泵和吸收式制冷机实现相互转换和梯级利用。系统外部能量来源包括可再生能源,即太阳能和氢能,同时电子系统与电网相连,使电能可在系统负荷过剩时向外输出,负荷不足时向内引入。

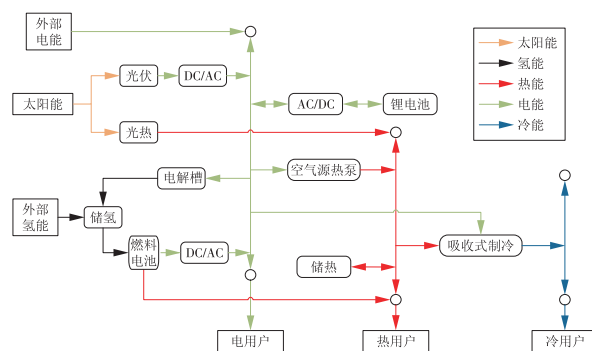


图 1 IES 结构示意图

Fig. 1 IES structure

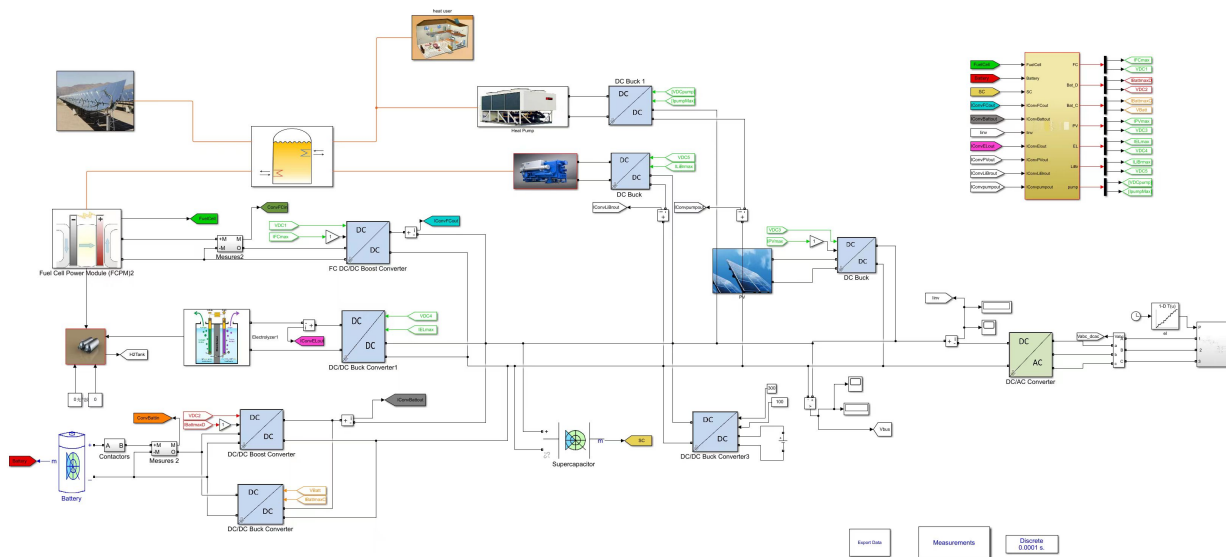


图 2 基于 Simscape 模块搭建的 IES 仿真模型(截图)

Fig. 2 IES simulation model based on Simscape module (screenshot)

1.2 设备模型

1.2.1 光伏光热模型

理论分析可知光伏电池的输特性具有非线性特征,温度和辐照度是决定光伏电池输出特性的2个重要参数。光伏设备所产生的电能为

$$P_{PV,t} = S_{PV} \times \eta_{PV} \times I_{GHI,t}, \quad (1)$$

式中:下标 t 代表一年中的不同季节或一天中的不同时间; $P_{PV,t}$ 为光伏板在 t 时刻产生的电功率; S_{PV} 为光伏板总面积; η_{PV} 为光伏板效率; $I_{GHI,t}$ 为 t 时刻的实时总水平辐射强度。

光热设备所产生的热功率为

$$P_{solar,t} = S_{solar} \times \eta_{solar} \times I_{GHI,t}, \quad (2)$$

式中: $P_{solar,t}$ 为光热设备在 t 时刻产生的热功率; S_{solar} 为光热设备总面积; η_{solar} 为光热设备的热效率。

1.2.2 燃料电池和电解槽模型

近几十年中,世界各国的研究人员对固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)建立了非常完善的物理模型^[12-18]。在以氢气为燃料的燃料电池中,电极间的电动势 E 使氧化还原反应发生,电路中的离子流由Nernst方程表示。

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right), \quad (3)$$

式中: E_0 为改进的电动势; R 和 F 分别为通用气体常数和法拉第常数; T 为电解槽内平均温度; p_{H_2} 、 p_{O_2} 、 p_{H_2O} 分别为氢气、氧气和水蒸气的分压。

SOFC系统通常由多个单电池堆叠,则对于 N 个串联堆叠的燃料电池的堆栈终端电压(考虑电阻、活化、浓度损失)为

$$V_{fc} = E_{oc} - V_{ohm} - V_{act} - V_{con}, \quad (4)$$

式中: V_{fc} 为堆栈的终端电压; E_{oc} 为开路电动势; V_{ohm} 为欧姆极化电压; V_{act} 为活化极化电压; V_{con} 为浓差极化电压。

1.2.3 吸收式制冷机和空气源热泵

1.2.3.1 吸收式制冷机

吸收式制冷机通过吸收热量制冷来弥补电制冷机的供冷不足,这是由于其制冷效率低于电制冷机。基于能量平衡建立其数学模型

$$P_{C,AC} = (P_{AC} + P_{H,AC})\eta_{AC}, \quad (5)$$

式中: $P_{C,AC}$ 为吸收式制冷机产生的冷功率; P_{AC} 为吸收式制冷机消耗的电功率; $P_{H,AC}$ 为吸收式制冷机消耗的热功率; η_{AC} 为吸收式制冷机的制冷效率。

1.2.3.2 空气源热泵

空气源热泵广泛应用于供热系统。基于能量平衡建立其数学模型

$$P_{H,HP} = P_{HP}\eta_{HP}, \quad (6)$$

式中: $P_{H,HP}$ 为空气源热泵产生的热功率; P_{HP} 为空气源热泵消耗的电功率; η_{HP} 为空气源热泵的制热效率。

1.2.4 储热罐和储氢罐

储罐模块模拟具有可变流体体积的热液体容器。储罐流体体积的绝对压力假定为常量。在油箱加压等于大气压力的特殊情况下,该模块表示常温常压下的露天储罐,但是燃料电池和光热产出的热能都是超过100℃的高品位的热,本节建立的储罐模型对内容介质进行了加压处理,使得水的沸点提高,进而可以在不发生相变的前提下储存更多的热量。

储热罐可以与周围环境进行能量交换,使其内部温度和压力随时间而变化。当液体进入或离开腔室时,通过对流进行热传递;当热能流经罐壁和储罐进、出口处的液体时,通过传导进行热传递。储罐模型考虑了通过储罐壁的热传递。

能量守恒方程

$$m(c_p - h\alpha) \frac{dT}{dt} = \Phi - \frac{dm}{dt}h + Q, \quad (7)$$

式中: m 为质量; c_p 为储热介质的比热容; h 为流体比焓; α 为流体等压体积模量; T 为温度; t 为时间; Φ 为进入储罐的热流量; Q 为罐壁与环境的换热量。

氢气储存模块模拟气体网络中的质量和能量储存。这个储罐含有恒定体积的气体,定义了2个入口和2个出口。储罐容积可以与连接的气体网络交换质量和能量,储罐壁面可以与环境交换热量,使其内部压力和温度随时间而变化。压力和温度是根据气体体积的可压缩性和热容量而变化的。

质量守恒涉及质量流量、气体的压力和温度,即

$$\frac{\partial m}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{\partial M}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{m,1} + \dot{q}_{m,2} + \dot{q}_{m,3} + \dot{q}_{m,4}, \quad (8)$$

式中: m 为储气罐中气体总质量; $\dot{q}_{m,1}$ 、 $\dot{q}_{m,2}$ 、 $\dot{q}_{m,3}$ 、 $\dot{q}_{m,4}$ 分别为储气罐2个进口和2个出口的质量流量; p 为压力。

储氢罐能量守恒涉及内部气体的温度、压力以及罐壁与外界的热交换,即

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} - \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt}, \quad (9)$$

$$\frac{dQ}{dt} = h_w S_e (T_w - T_i), \quad (10)$$

式中: U 为储氢罐内能; Q 、 W 分别为气体储罐向外界散出的热量和对外做功; $\dot{m}_{in}$ 、 $\dot{m}_{out}$ 分别为进、出储罐的气体质量; h_{in} 、 h_{out} 分别为进、出储罐的气体比焓; h_w 为对流换热系数; S_e 为传热面积; T_w 为壁面温度; T_i 为环境温度。

2 能量平衡约束

为了让模型模拟情况符合物理规律并且尽可能接近实际可再生 IES 的运行情况,还需要作出以下约束和假设:系统中各形式的能量负荷及需求都需要在运行优化的每个时间节点内得到满足。对于电能,在整个系统中,可以产生电能的设备有光伏设备、燃料电池;需要消耗电能的设备有电解槽、吸收式制冷机、热泵。系统需要对外供应电能负荷,且电池可在每个时刻存储或取出电能。于是整个系统的电能平衡可由下式表示

$$E_{PV,t} + E_{FC,t} + E_{bat,i,t} = E_{d,t} + E_{EL,t} + E_{AC,t} + E_{HP,t} + E_{bat,o,t}, \quad (11)$$

式中: $E_{PV,t}$ 为光伏板在 t 时刻产生的电能; $E_{FC,t}$ 为燃料电池在 t 时刻产生的电能; $E_{bat,i,t}$ 为电池在 t 时刻利用的电能; $E_{d,t}$ 为系统在 t 时刻的电负荷; $E_{EL,t}$ 为电解槽在 t 时刻产生氢气消耗的电能; $E_{AC,t}$ 为吸收式制冷机在 t 时刻消耗的电能; $E_{HP,t}$ 为空气源热泵在 t 时刻消耗的电能; $E_{bat,o,t}$ 为电池在 t 时刻存储的电能。

对于热能,可以产生热能的设备有光热设备、燃料电池、空气源热泵;需要消耗热能的设备有吸收式制冷机。同样,系统需要对外供应热能负荷,且储热罐可存储或取出热能。整个系统的热能平衡可由下式表示,即

$$E_{H,solar,t} + E_{H,FC,t} + E_{H,HP,t} + E_{st,o,t} = E_{H,d,t} + E_{H,AC,t} + E_{st,i,t}, \quad (12)$$

式中: $E_{H,solar,t}$ 为光热设备在 t 时刻从太阳能中获取的热能; $E_{H,FC,t}$ 为燃料电池在 t 时刻被回收利用的热能; $E_{H,HP,t}$ 为空气源热泵在 t 时刻将高品位电能转化为的热能; $E_{st,o,t}$ 为储热罐在 t 时刻输出的热能; $E_{H,d,t}$

为系统在 t 时刻的热负荷; $E_{H,AC,t}$ 为吸收式制冷机在 t 时刻消耗的热负荷; $E_{st,i,t}$ 为储热罐在 t 时刻存储的热负荷。

对于冷能,吸收式制冷机直接产生冷能用于供应冷负荷,此外没有其他冷能相关设备。整个系统的冷能平衡可由下式表示,即

$$E_{C,AC,t} = E_{C,d,t}, \quad (13)$$

式中: $E_{C,AC,t}$ 为吸收式制冷机在 t 时刻产生的冷能; $E_{C,d,t}$ 为系统在 t 时刻的冷负荷。

对于氢气,系统中主要由电解槽产生氢气供应燃料电池,不需要向外界供应氢气但可从外界购买氢气,储氢设施可用于氢气的存储,氢气平衡可由下式表示,即

$$h_{EL,t} + h_{pur,t} + h_{st,o,t} = h_{FC,t} + h_{st,i,t}, \quad (14)$$

式中: $h_{EL,t}$ 为电解槽在 t 时刻产生的氢气比焓; $h_{pur,t}$ 为系统在 t 时刻从外界购买的氢气比焓; $h_{st,o,t}$ 为储氢罐在 t 时刻利用的氢气比焓; $h_{FC,t}$ 为燃料电池在 t 时刻消耗的氢气比焓; $h_{st,i,t}$ 为储氢罐在 t 时刻存储的氢气比焓。

3 IES 运行策略

3.1 电能管理策略

本文设计的电能管理规则如图 3 所示,图中 S_{OC} 代表锂电池充电状态。它的工作流程如下:首先对当前光伏电池发电量与负载需求量作差,根据其值的正负进行下一步;其次对锂电池的充电状态进行判断,判断其是否达到最大或最小设定值;最后对光伏发电与负载的差值、燃料电池当前功率、电解水当前功率以及锂电池的功率进行一系列比较操作,来判断具体使用何种规则对能源进行管理。

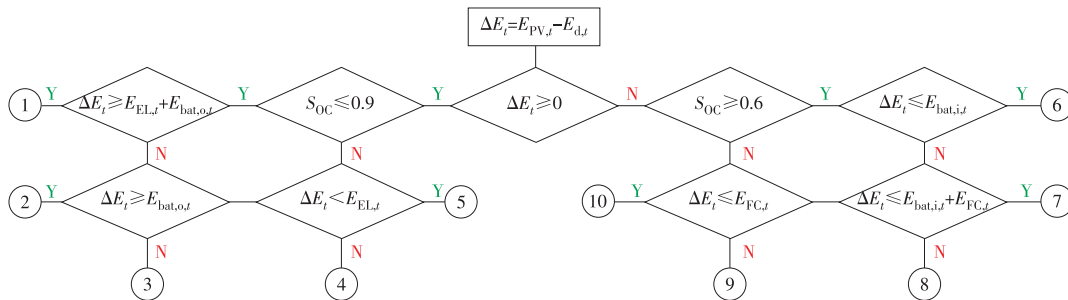


图 3 电能管理规则

Fig. 3 Electric energy management rules

本文根据上述规则共设计了 10 种工作状态,以下对上述规则进行具体分析。

(1) 当光伏电池的输出功率大于负载需求功率,且锂电池的充电状态未达到最大充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于电解水需求功率和锂电池充电所需功率时,光

伏富余的功率为电解水制氢和锂电池充电提供能量,将多余能源储存起来。

(2) 当光伏电池的输出功率大于负载需求功率,且锂电池的充电状态未达到最大充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于锂电池充电所需功率但是不足以同时为电解

水制氢提供能量时,光伏富余的功率为锂电池充电提供能量,而放弃通过电解水制氢来储存能量。

(3)当光伏电池的输出功率大于负载需求功率,且锂电池的充电状态未达到最大充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值小于锂电池充电所需能量(锂电池快速充电阶段的最佳充电电流包括3个阶段,分别是预充电时的最佳电流、恒流充电时的最佳电流和恒压充电时的最佳电流,此处根据预充电阶段的最佳电流和阈值电压设定了初始阈值功率)时,光伏富余的功率不再为电解水制氢或锂电池充电提供能量,富余的能量无法被利用。

(4)当光伏电池的输出功率大于负载需求功率,但是锂电池的充电状态达到了最大充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于电解水制氢所需功率时,光伏富余的功率此时不能为锂电池充电,而为电解水制氢提供能量,将多余能源储存起来。

(5)当光伏电池的输出功率大于负载需求功率,但是锂电池的充电状态达到了最大充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值小于电解水制氢所需功率时,光伏富余的功率既不能为锂电池充电也不能为电解水制氢提供能量,富余的能量无法被利用。

(6)当光伏电池的输出功率小于负载需求功率,且锂电池的充电状态大于最小充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值小于最小放电功率时,锂电池放电来补充不足的功率,而无须启动燃料电池。

(7)当光伏电池的输出功率小于负载需求功率,且锂电池的充电状态大于最小充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于锂电池放电功率,且其差值小于锂电池放电功率与燃料电池最小输出功率时,启动燃料电池会有一部分多余的能源。

(8)当光伏电池的输出功率小于负载需求功率,且锂电池的充电状态大于最小充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于锂电池放电功率,且其差值大于锂电池放电功率与燃料电池最小输出功率时,启动燃料电池,燃料电池的输出功率由功率缺口决定。

(9)当光伏电池的输出功率小于负载需求功率,且锂电池的充电状态小于最小充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值小于燃料电池最小输出功率时,启动燃料电池会有一部分多余的能源。

(10)当光伏电池的输出功率小于负载需求功率,且锂电池的充电状态小于最小充电设定百分值,并且光伏电池的输出功率与负载需求功率差值大于燃料电池最小输出功率时,启动燃料电池,燃料电池的输出功率由功率缺口决定。

设计上述规则时需要遵循一定的能源利用规律,考虑的原则主要有以下几方面。

(1)在设计第1层管理策略的时候,就已经将光伏发电的优先级设计的比燃料电池和锂电池的优先级要高。这是因为通常在一定光照强度下,光伏发电的功率基本可以保持恒定,而且它是清洁能源,获取成本也较低,所以优先考虑使用光伏电池发电量。

(2)在进行第2,3层策略判断的时候,将锂电池的充电优先级设定的比电解水制氢的优先级要高。这是因为在储存相同能源时,锂电池的充电效率远比电解水制氢效率高,能充分利用多余的能源。

(3)在光伏发电量小于负载需求量,需要启动锂电池放电或者燃料电池时,将锂电池放电的优先级设定为大于燃料电池的优先级,这同样是因为锂电池的放电效率比燃料电池放电的效率要高。

(4)当锂电池的充电状态达到最大设定百分值时,锂电池不再能储存更多的能源,此时才会考虑将多余的能源通过电解水制氢进行储存,而不是直接浪费。

以上原则充分考虑了各设备的功率特性和储能、放能特点,基于多余能源充分利用,减少不必要的能源浪费进行考量。如果能源设备或其特性发生改变,需要对规则进行相应的调整。

3.2 热能管理策略

微网系统中的产热模块有燃料电池、空气源热泵和太阳能集热器;耗热模块有吸收式制冷机和用户用热。

热流量是基于规则的热管理策略,用储罐的热能调节产热模块和耗热模块热量的不平衡,热能管理规则可分为以下4种,如图4所示。

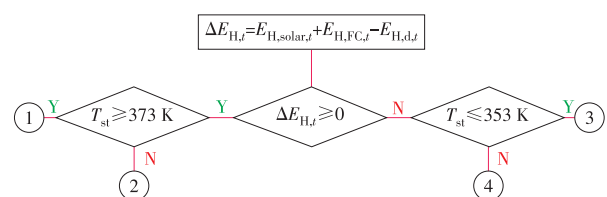


图4 热能管理规则

Fig. 4 Thermal energy management rules

(1)光热和电池余热足够用户热需求,储热罐温度 T_{st} 达到上限,剩余热视为热损失。

(2) 光热和电池余热足够用户热需求, 储热罐温度未达上限, 剩余热与储罐内的介质换热, 使储罐的温度升高。

(3) 光热和电池余热不够用户热需求, 储热罐温度达到下限, 不足的热负荷需求通过热泵消耗电能进行补偿。

(4) 光热和电池余热不够用户热需求, 储热罐温度未达下限, 不足的热负荷需求通过储热罐的内能进行补偿。

其中, 储热罐的温度上限设定为指定压强下的水的饱和温度, 如在 5 个大气压的压强下, 水的沸点约为 150°C 。为了保证供给用户热需求时的换热效果, 设定水的最低温度为 80°C , 在温度低于该值时, 启用热泵补偿欠缺的热需求。

4 IES 特性仿真

4.1 场景 1

场景 1 模拟光能输入增强, 负荷侧需求略有上升的储能过程, 即在源侧供给充足时, 负荷侧设备的调配情况。光伏功率和居民电负荷对比如图 5 所示, 显示了在 1 000 s 的仿真时长内, 光伏功率和居民电负荷的增长过程。光伏功率从 1 500 W 逐步上升到 3 500 W 附近, 同时居民用电需求也有一定程度的上升。总体而言, 光伏功率满足居民用电需求, 且存在较大的电能剩余量。整个仿真过程根据设备的运行情况可分为 4 个阶段, 如图 6 所示。

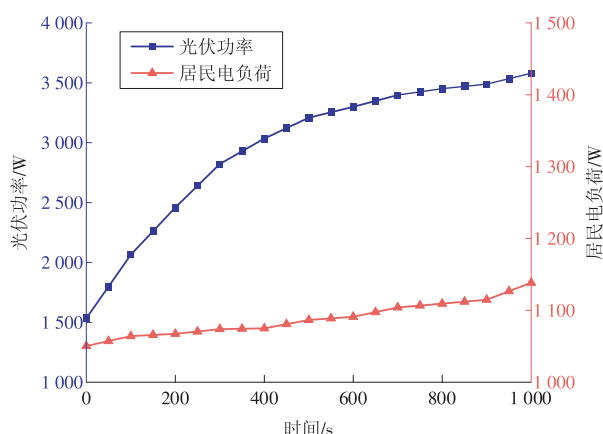


图 5 光伏功率和居民电负荷对比

Fig. 5 Comparison of PV power and residential electric load

第 1 阶段为 0~150 s, 此时系统的电源仅有光伏功率, 电能消耗有居民电负荷和吸收式制冷机电功率, 光伏稍有富余但不足 500 W, 此时剩余的电能未达到锂电池充电的阈值功率, 因此多余的电能视为弃电, 没有储能项。

第 2 阶段为 150~500 s, 此时光伏功率和居民电负荷均进一步提高, 因光伏增长较快致使富余电能

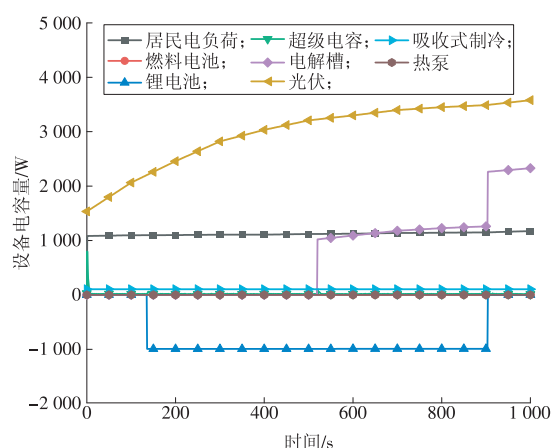


图 6 场景 1 设备电容量变化

Fig. 6 Equipment electric capacity variation under scenario 1

也进一步提高, 并在 150 s 后 (约 170 s) 突破锂电池的充电阈值功率, 锂电池开始以 1 000 W 的功率进行充电。此时光伏发电在满足居民负荷、吸收式制冷机耗电和锂电池充电之后, 其富余量不足以满足电解槽运行的最低需求, 剩余电能作为弃电处理。由于锂电池具有最大的充电功率限制, 其不具备大规模消纳可再生能源发电的能力, 随着输入系统的电能不断增加, 电解水制氢是一种可以变负荷消纳电能的设备。

第 3 阶段为 500~900 s, 此时剩余电能达到电解槽运行的功率下限, 电解槽开始工作, 由于电解槽具备应对变工况的能力, 因此随着光伏发电的进一步增强, 电解槽的功耗也随之提高, 用以消纳波动的剩余可再生能源发电。

第 4 阶段为 900~1 000 s, 在 900 s 时锂电池电量达到上限, 充电随即停止, 剩余电能按照策略分配到电解槽用以产生氢气。

上述电能变化过程中, 不涉及燃料电池、空气源热泵等产热设备的波动, 因此热能消耗和供给始终随光热的增长处于平稳的变化状态。在 1 000 s 的仿真时长内, 光热功率和居民热负荷的增长过程如图 7 所示。光热功率随着光能输入增强逐步从 2 000 W 上升到 4 200 W, 而居民热负荷则从 1 450 W 缓慢上升到 1 540 W。场景 1 热容量变化如图 8 所示。在 1 000 s 仿真时长内, 光热功率与光伏功率呈现相似的增长趋势, 而居民热负荷和吸收式制冷耗热变化较缓, 此时光热设备和储热罐共同满足居民热负荷和吸收式制冷耗热。

储热罐内的温度变化曲线如图 9 所示。在前期光热功率略低于居民热负荷和吸收式制冷耗热需求, 不足的热量从储热罐抽取, 因此储热罐温度有小幅下降。后期随着光热功率不断增强, 多余的热负荷用于补给储热罐, 其温度有所上升。

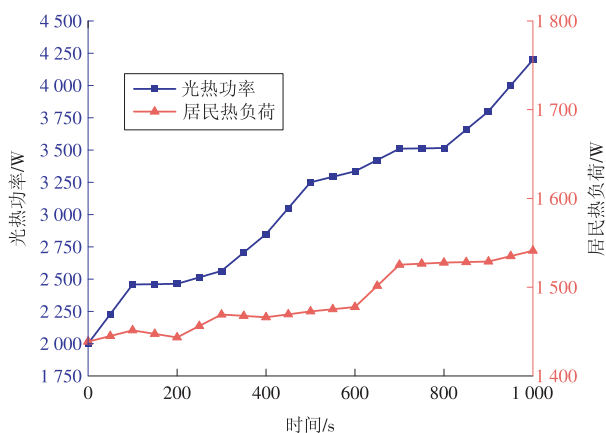


图7 光热功率和居民热负荷对比

Fig. 7 Comparison of photothermal power and residential heating load

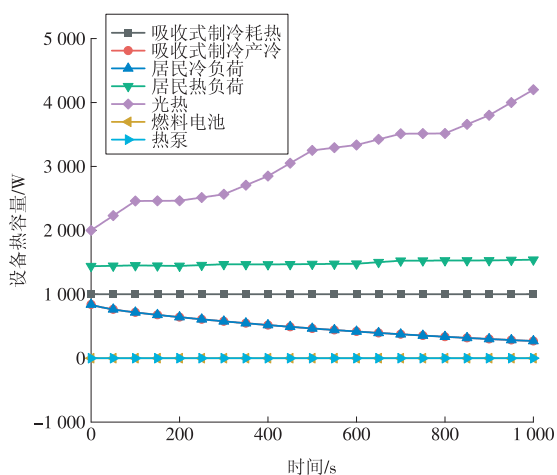


图8 场景1设备热容量变化

Fig. 8 Equipment heat capacity variation under scenario 1

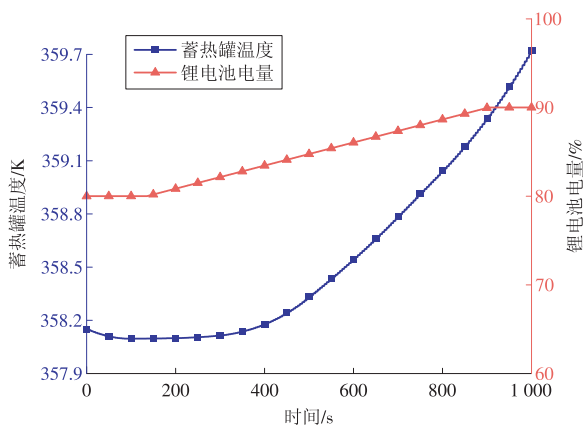


图9 场景1储热罐温度和锂电池电量

Fig. 9 Heat storage tank temperature and lithium battery SOC under scenario 1

4.2 场景2

场景2模拟傍晚时光伏出力不足,负荷侧电需求增加,但光伏发电不满足供电需求的过程。本场景主要模拟在负荷侧需求始终处于高水平时,源侧设备的调配情况。在1000 s的仿真时长内,光伏功率下降和居民电负荷增长过程如图10所示。

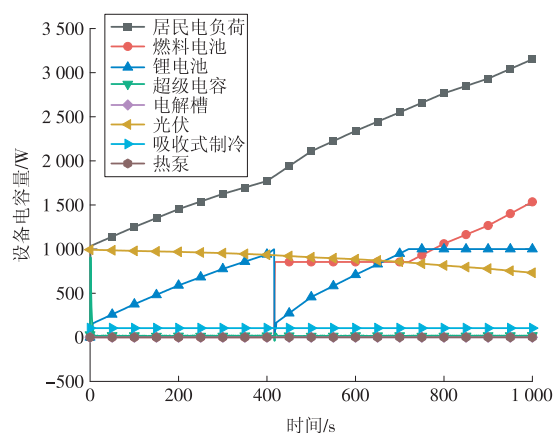


图10 场景2设备电容量变化

Fig. 10 Equipment electric capacity variation under scenario 2

居民电负荷从1000 W逐步上升到3100 W附近,同时光伏发电逐渐下降。但总体而言,光伏功率始终不能满足居民用电需求。整个仿真过程根据设备的运行情况可分为3个阶段。

第1阶段为0~400 s。此时负荷侧设备有以额定功率运行的吸收式制冷机和逐渐增加的居民电负荷。初始时刻可再生能源电力仅有1000 W,且随时间不断下降。在初始时刻由锂电池和光伏共同出力为负荷侧提供电能,且随着居民用电量的持续上涨,锂电池的输出功率也逐步上涨以满足供电需求。

第2阶段为400~700 s。在第400 s时,锂电池的输出功率达到其最大的设定值1000 W,意味着锂电池受最大出力功率限制,使得即使其电量未降低到下限,也不具备跟随负荷侧需求而大范围变化供电功率的能力。而在氢燃料可以补充的假设下,燃料电池则具备这一特征,即在光伏和锂电池均不能满足供电需求的情况下,燃料电池可以长期运行在动态下,并可以随负荷侧电需求变化而大范围地变化燃料电池的出力。

由于燃料电池有最小的输出功率限制,因此其启动后功率至少维持在800 W,而此时800 W的骤增对于负荷侧是多余的,因此根据策略,会削减灵活型较强的锂电池的发电功率。在400 s往后的过程中,依然是一个锂电池输出功率随负荷需求线性增加的过程。能量流动示意如图11所示。

第3阶段为700~1000 s。在700 s时,锂电池的最大输出功率再次达到上限,并以1000 W的最大功率持续输出。此时负荷侧电需求仍在上升,此时燃料电池开始增大耗氢和输出功率,以满足用电需求。

在热负荷方面,根据电负荷的分配也可分为3个阶段,如图12所示。在400 s以前,居民热负荷维

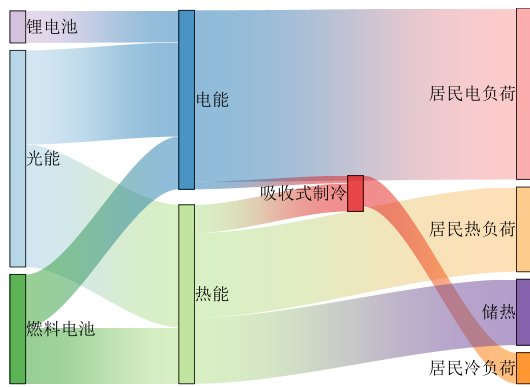


图 11 500 s 时系统的能量流动示意

Fig. 11 Schematic energy flow of the system at 500 s

持在 1 500 W 附近小范围波动,而光热补给随时间下降,因此在 200 s 往后储热罐开始向居民提供热负荷。

在 400 s 时,根据电负荷的供需逻辑,燃料电池开始启动用以提供居民电负荷,根据 SOFC 约 56% 的发电效率,燃料的化学能损耗为热能可以被系统热负荷利用,然而燃料电池的热供给超过用户侧热需求,多余的热量将被送往储热罐进行储热。在 400 s 后储热罐始终处于不同功率的储热状态。

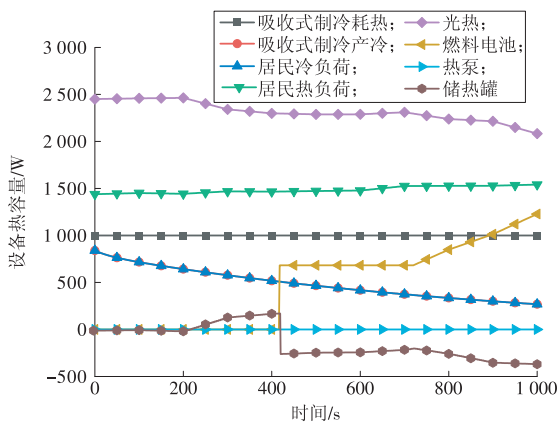


图 12 场景 2 设备热容量变化

Fig. 12 Equipment heat capacity variation under scenario 2

结合电、热负荷的调度规则,锂电池电量和储热罐温度如图 13 所示。锂电池由于全程都以不同的功率放电,因此锂电池电量下降,且由于最大放电功率的限制其下降的斜率存在极大值,而储热罐的温度依据热负荷的分配规则先下降后上升。

4.3 场景 3

场景 3 模拟了光伏不变、居民负荷下降时,系统先耗能后储能的过程。在光伏稳定的情况下,居民电负荷下降过程如图 14 所示。针对系统从供能到储能的过程,模拟了燃料电池从停机到电解水启动的过程。

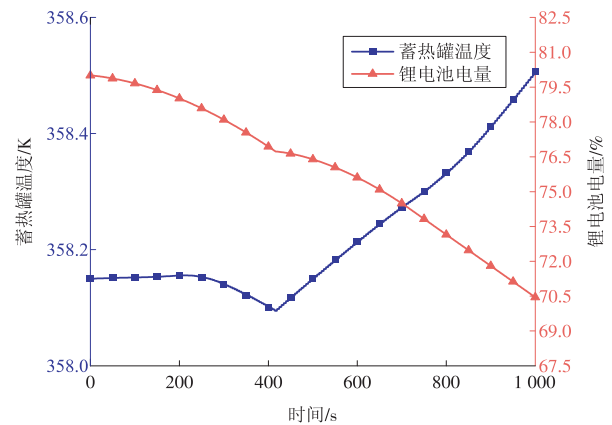


图 13 场景 2 储热罐温度和锂电池电量

Fig. 13 Heat storage tank temperature and lithium battery SOC under scenario 2

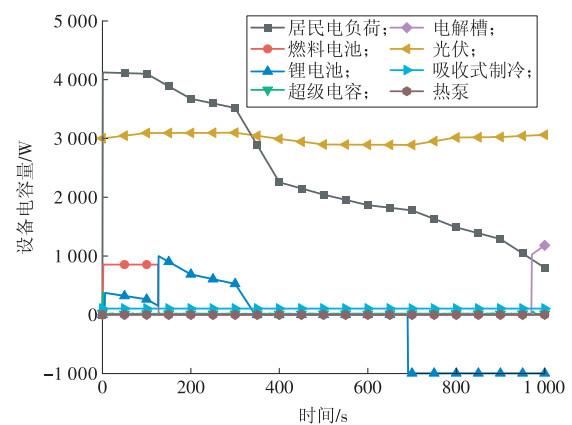


图 14 场景 3 设备电容量变化

Fig. 14 Equipment electric capacity variation under scenario 3

由图 14 可知,随着负荷侧用电量的减少,燃料电池在 125 s 首先被关停,关停后由锂电池补足燃料电池出力骤降带来的空缺,随后锂电池供电功率不断下降,直到 340 s 附近光伏功率超过居民用电功率,此时锂电池关停,随后仅由光伏向系统供电,多余部分作为弃电处理。

在 700 s 时,多余电量达到锂电池的最低充电阈值,锂电池开始以 1 000 W 的功率蓄电,而后居民电负荷进一步降低,可再生能源富余电力足够提供电解负荷,电解水制氢在 970 s 开始运行以消纳电能。

居民热负荷比较稳定,光热功率始终低于居民热负荷的情况下,储热罐供能的变化过程如图 15 所示。

在 0~125 s 仿真时长内,光热、燃料电池余热和储热罐共同承担居民的热负荷。随着燃料电池被关停,储热罐的供能变化与光热的变化总体呈现反向波动趋势,说明储热罐弥补了光热供热不足的部分。

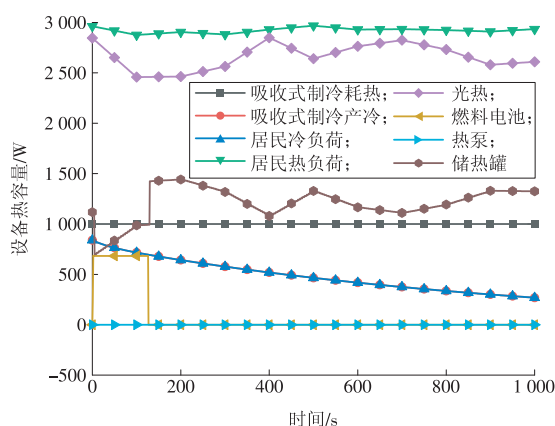


图15 场景3设备热容量变化

Fig. 15 Equipment heat capacity variation under scenario 3

5 结论

本文对未来城市中IES的4组典型模型进行了介绍,并给出了设备能量平衡的约束。根据不同设备的效率、启停速度等实际情况,分别对热设备和电设备制定了管理和调度策略,考虑了各设备的功率特性和储能、放能特点,通过多余能源充分利用,旨在提高能源利用效率,减少不必要的能源浪费。

最后给出了3种不同的应用场景,并在能量平衡约束下,根据制定的规则测试了在不同场景中系统的运行情况,即在可再生能源发电充足的情况下,针对负荷侧电量消纳进行分配,展示了系统的储能调度过程。在可再生能源发电不足的情况下,针对源侧的出力方式进行分配,展示系统的供电供热调度过程。针对锂电池电量充满或者放尽的情况进行了仿真,阐述了燃料电池和电解水制氢系统对电能大规模供给和大容量消纳的影响。本文的系统建模、策略制定和场景分析过程为IES设备的容量选型和出力调度提供了一定的指导和参考。

参考文献:

- [1]朱继忠,黄琦.综合智慧能源关键技术[J].全球能源互联网,2022,5(5):417-418.
ZHU Jizhong, HUANG Qi. Key technologies for integrated smart energy system [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(5): 417-418.
- [2]韩世旺,赵颖,张兴宇,等.面向碳中和的新型电力系统氢储能调峰技术研究[J].综合智慧能源,2022,44(9):20-26.
HAN Shiwang, ZHAO Ying, ZHANG Xingyu, et al. Researches on hydrogen storage peak-shaving technology for new power systems to achieve carbon neutrality [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 20-26.
- [3]罗丽琦,王月,钟海军,等.固体氧化物燃料电池热电联供

系统设计[J].综合智慧能源,2022,44(8):25-32.

LUO Liqi, WANG Yue, ZHONG Haijun, et al. Design of the CHP system integrated with SOFC [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(8): 25-32.

- [4]陆王琳,陆启亮,张志洪.碳中和背景下综合智慧能源发展趋势[J].动力工程学报,2022,42(1):10-18.

LU Wanglin, LU Qiliang, ZHANG Zhihong. An overview of the integrated energy systems' development under the background of carbon neutralization [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 10-18.

- [5]王梦雪,赵浩然,田航,等.典型综合能源系统仿真与规划平台综述[J].电网技术,2020,44(12):4702-4712.

WANG Mengxue, ZHAO Haoran, TIAN Hang, et al. Review of typical simulation and planning platforms for integrated energy system [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4702-4712.

- [6]张涛,郭玥彤,李逸鸿,等.计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.

ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.

- [7]汤翔鹰,胡炎,耿琪,等.考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(4):81-90.

TANG Xiangying, HU Yan, GEN Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.

- [8]王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1597-1608.

WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.

- [9]张淑婷,陆海,林小杰,等.考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J].高电压技术,2021,47(1):93-103.

ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-103.

- [10]白雪婷,杨瑞琪,陈泽春,等.计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):27-35.

BAI Xueting, YANG Ruiqi, CHEN Zechun, et al. Optimal operation of the park integrated energy system considering integrated demand response [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 27-35.

- 27-35.
- [11] LI F, SUN B, ZHANG C, et al. A hybrid optimization-based scheduling strategy for combined cooling, heating, and power system with thermal energy storage[J]. *Energy*, 2019, 188: 115948.
- [12] 靳方圆, 陈鑫, 周海峰, 等. 船用固体氧化物燃料电池电堆建模与仿真[J]. *船舶工程*, 2021, 43(10): 104-110, 138.
- JIN Fangyuan, CHEN Xin, ZHOU Haifeng, et al. Modeling and simulation of marine solid oxide fuel cell stack[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(10): 104-110, 138.
- [13] 曹屹立, 张洪源, 梁艳. 基于无线射频和GPRS网络的室温分级监测系统[J]. *电子测试*, 2016(17): 110-111.
- CAO Yili, ZHANG Hongyuan, LIANG Yan. Room temperature classification monitoring system based on wireless RF and GPRS Network[J]. *Electronic Test*, 2016(17): 110-111.
- [14] 丁雪峰. 基于物联网的供热系统用户侧监测系统研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- DING Xuefeng. Research on user-side monitoring system of heating system based on Internet of Things [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2021.
- [15] 刘海燕, 程伟佳, 牛小化, 等. 基于物联网技术的北方民用建筑供暖数据获取方法[J]. *区域供热*, 2022(2): 108-116.
- LIU Haiyan, CHENG Weijia, NIU Xiaohua, et al. Data acquisition method of heating system in northern civil buildings based on Internet of Things technology [J]. *District Heating*, 2022(2): 108-116.
- [16] 赵红燕. 集中供热用户室温远程采集系统研究与开发[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- ZHAO Hongyan. Central heating user remote collection system research and development at the room temperature [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [17] 王卓容, 石庆鑫. 基于拓扑重构与分布式电源调度的配电网灾后恢复策略[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(2): 29-34.
- WANG Zhuorong, SHI Qingxin. Post-disaster restoration strategy of power distribution systems based on topology reconfiguration and distributed generation scheduling [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(2): 29-34.
- [18] 倪新宇, 茅大钧. 基于数据融合的超临界机组设备故障诊断研究[J]. *华电技术*, 2018, 40(7): 5-9, 77.
- NI Xinyu, MAO Dajun. Research on fault diagnosis technology of supercritical unit based on data fusion [J]. *Huadian Technology*, 2018, 40(7): 5-9, 77.

(本文责编: 张帆)

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-03-13
上网日期: 2023-04-13; 附录网址: www.iienenergy.cn

作者简介:

韩朝兵(1990), 男, 高级工程师, 硕士, 从事热力系统仿真建模及综合智慧能源研究与咨询工作, hanchaobing@spic.com.cn;

汤冰(1988), 男, 工程师, 硕士, 从事机电系统研发与应用, tangb_123@qq.com;

尹瑞麟(1998), 男, 从事热工系统及电化学设备的动态机理建模与自动控制设计工作, yin.ruilin@foxmail.com;

朱正香(1991), 女, 工程师, 硕士, 从事电厂热动力及计划统计工作, zhuzhengxiang@spic.com.cn;

薛明华(1983), 男, 高级工程师, 博士, 从事火电厂节能减排和状态检测工作, xueminghua@spic.com.cn;

祝建飞(1972), 男, 正高级工程师, 硕士, 从事电厂热动力及自动化控制的研究与应用, zhujianfei@spic.com.cn;

艾春美(1973), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电厂热工控制工作, aichunmei@spic.com.cn;

孙立*(1989), 男, 副研究员, 博士生导师, 从事综合能源系统规划、调整、控制方面的研究, sunli12@seu.edu.cn。

*为通信作者。