

# “双碳”背景下能源互联网数字孪生系统的设计及应用

林峰<sup>1</sup>,肖立华<sup>1</sup>,商浩亮<sup>2</sup>,徐畅<sup>1</sup>,罗仲达<sup>1</sup>,陈俊杰<sup>1</sup>,马小丰<sup>2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司,湖南长沙 410000;2. 北京洛斯塔科技发展有限公司,北京 100088)

**摘要:**为提高能源供需平衡、降低能源消耗,提出“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统设计。通过物理感知层、传输交互层、数据共享层、应用服务层以及虚拟空间和安全防护构成能源互联网数字孪生系统的整体框架。从二氧化碳排放量和容量投资成本这2个目标出发,构建目标函数,在相关约束条件的基础上,采用和声搜索算法求解目标函数,实现能源互联网的规划,完成能源互联网数字孪生系统的设计。实验结果表明,所设计系统的燃气、水和电消耗量均较低,且蓄电池容量高、能源供需平衡。

**关键词:**“双碳”背景;能源互联网;数字孪生;系统设计;和声搜索算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.003 中图分类号:TP391 文章编号:1673-9140(2022)01-0029-06

## Design and application of energy internet digital twin system under the background of "dual carbon"

LING Feng<sup>1</sup>,XIAO Lihua<sup>1</sup>,SHANG Haoliang<sup>2</sup>,XU Chang<sup>1</sup>,  
LUO Zhongda<sup>1</sup>,CHEN Junjie<sup>1</sup>,MA Xiaofeng<sup>2</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. Beijing Luosida Technology Development Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to improve the balance of energy supply and demand and reduce energy consumption, the design of digital twin system of energy Internet under the background of "double carbon" is proposed. The physical perception layer, transmission interaction layer, data sharing layer, application service layer, virtual space and security protection constitute the overall framework of the digital twin system of energy Internet. Starting from the two objectives of carbon dioxide emissions and capacity investment cost, the objective function is constructed. Based on relevant constraints, the harmonic search algorithm is applied to solve the objective function, so as to realize the planning of the energy Internet and complete the design of the digital twin system of the energy Internet. The experimental results show that the gas consumption, water consumption and electricity consumption of the designed system are low, and the storage battery capacity is high, and the energy supply and demand are balanced.

**Key words:** "dual carbon" background; energy internet; digital twin; system design; harmony search algorithm

为推进新能源清洁低碳的发展,中国提出增加风电、太阳能等非化石能源在能源结构中的占比。在节能减排的背景下,需要对能源系统进行深度规划。传统能源系统在规划和运行过程中的决策通常是较为单一的能源形式,主要包括热能源、气能源和电能源。通过资源优化配置可以在大范围内实现多种资源的优势互补<sup>[1]</sup>。数字孪生指的是根据获取的设备数据建立数学模型,通过对比数学模型与工程设计之间的差距,制定策略管理设备的使用寿命<sup>[2]</sup>。

对综合能源互联网数字孪生系统进行设计,可以解决能源短缺问题,提高能源利用率。国内有学者提出了相关的研究,文献[3]通过高级着色语言和C++设计系统,通过数字孪生体与物理实体在系统中实现相互映射和交互融合,利用数字孪生体实现操作控制和物理实体的反馈模拟,完成系统设计;文献[4]通过数字技术对物理对象的性能、特征、形成过程和行为进行建模分析,通过TRIZ失效预测工具和设计参数获取系统失效参数,并在数字孪生模型的基础上实现参数演化,完成系统设计;文献[5]从物理实体、虚拟孪生体、数据、交互接口、服务五维要素的特征进行分析,由此构建包含特征的五维数字孪生驱动模型;文献[6]分析数字孪生在工业互联网中的特点及关键技术,构建工业互联网的五层体系架构,建立数字孪生工业数据分析模型。

以上系统因为没有规划能源互联网,导致系统存在燃气、水和电消耗量过高、蓄电池容量低和能源供需不平衡的问题。为解决上述系统中存在的问题,提出“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统设计系统,解决并优化传统系统中存在的问题,为系统的推广和运行奠定基础。

## 1 能源互联网数字孪生系统

本文所设计的“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统,根据能源互联网的实际需求,通过数字孪生模型并结合安全、感知、仿真、传输、应用和平台等环节<sup>[5-6]</sup>,针对智能实体和物理实体的性能、特征、形成过程和行为,结合人工智能技术、物联网技术和传感器技术进行建模,在虚拟空间中完成智能实体和物理实体的映射。为了完成实体未来态的预测和演

化,在虚拟空间中对实体进行时空变换,在智能体中输入异常结果,并对其分析,向真实世界传输解决方案,对错误进行改进,保障能源互联网在“双碳”背景下的稳定、安全运行,可描述为

$$E_{IDTS} = \{P_{\text{Sensor}}, C_{\text{Network}}, D_{\text{Platform}}, S_{\text{Application}}, V_{\text{Simulation}}\} \otimes \{A_{\text{Security}}\} \quad (1)$$

式中  $P_{\text{Sensor}}$  为物理空间,其主要作用是在真实世界中,利用传感器采集数据,解决数据准确性和真实性的问题;  $A_{\text{Security}}$  为系统防护,全过程通过加密技术提高安全性,在数据采集、数据使用、数据存储和数据传输等过程中保障数据的安全性;  $C_{\text{Network}}$  为连接,通过5G技术提高数据的更新和传输速度;  $V_{\text{Simulation}}$  为虚拟空间,通过仿真技术建立智能和物理实体的数字孪生体,避免随时空演变问题和高保真模拟问题的出现;  $D_{\text{platform}}$  为数据,在平台共享数据和存储数据的过程中避免溯源问题、复用问题和存储问题的出现;  $S_{\text{Application}}$  为服务,通过应用服务在人工智能模型的基础上避免闭环优化问题的出现。所提方法设计的能源互联网数字孪生系统的结构如图1所示。

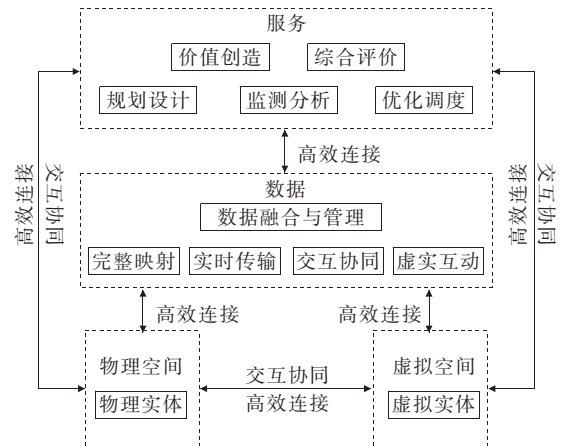


图1 能源互联网数字孪生系统结构

Figure 1 Digital twin system structure of energy internet

### 1.1 物理感知层

系统的基础是物理感知层,该层的主要目的是在真实世界源中感知并采集源环节、网环节、荷环节和储环节中存在的数<sup>[7-8]</sup>,按照自下而上、从小到大的顺序对物理感知层进行划分,划分结果如图2所示。

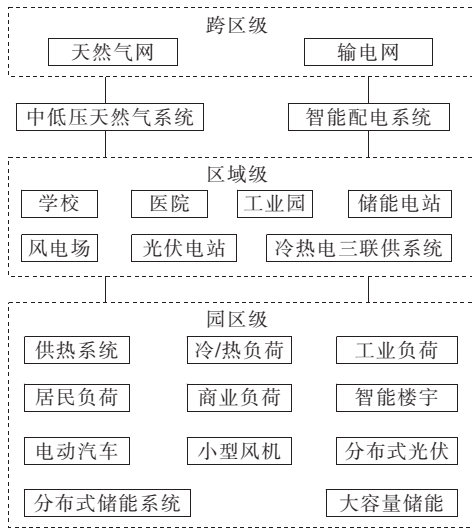


图 2 物理实体

Figure 2 Physical entity

## 1.2 传输交互层

在系统中通过交互传输构建网络设施,完成各环节之间的交互协同、实时交互和高效连接。数据传输通常情况下包括智能实体与虚拟空间、智能实体与数据平台、虚拟空间与数据平台、智能实体与物理实体、虚拟空间与物理实体、数据平台与物理实体之间的连接。

## 1.3 数据共享层

在系统中数据共享层属于动力库,数据在数据共享层中完成共享与存储,智能应用模型在系统中为数据共享层提供驱动力<sup>[9-10]</sup>。包括虚拟空间中存在的多元数据、知识数据、模拟数据;智能实体中存在的多元数据、知识数据、模拟数据;智能实体中存在的多元数据、知识数据、模拟数据;智能实体中存在的多元数据、知识数据、模拟数据;智能实体中存在的多元数据、知识数据、模拟数据;智能实体中存在的多元数据、知识数据、模拟数据。

## 1.4 应用服务层

根据数据共享层中的数据设计在线应用服务,虚拟空间通过应用服务层优化物理实体的闭环反馈。在人工智能算法模型和数据共享平台的基础上应用服务可以在虚拟空间和物理空间中运行,并通过时空演进结果对应用服务层的输出进行更新。

## 1.5 虚拟空间

虚拟空间通常情况下是由智能实体和物理实体构成的数字孪生体,其主要作用是在虚拟空间中完成真实世界的镜像复制。物理实体通过数据融合驱动模型<sup>[11-12]</sup>、数据驱动模型和物理机模型构成对应的数字孪生体,智能实体通过算法模型获得对应的

数字孪生体。

## 1.6 安全防护

各环节在数字孪生系统中的安全保障是安全防护层,该层的主要目的是保障应用服务、设备接入、算法模型代码、数据平台访问和数据传输交互的安全。

## 2 基于数字孪生的能源互联网规划

### 2.1 目标函数

能源互联网数字孪生系统将二氧化碳排放量和容量投资成本作为目标,在数字孪生基础上构建能源互联网规划模型。

将最小化投资成本作为第 1 个目标函数,即

$$\min C = \sum_{i \in T} \sum_{n \in N} \left\{ \left[ CI \frac{h(1+h)^t}{(1+h)^t - 1} + C_{F-n} \right] P_n (1+h)^t \right\} + \sum_{i \in T} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} [(C_{V-i} + C_{FF-i} + C_E \cdot \lambda_c) P_{i,m,t} \Delta_m (1+h)^{-t}] \quad (2)$$

式中  $C$  为投资成本;  $T$  为时间;  $N$  为新增气源、电源、热源和风力发电的数量;  $I$  为能源供给单元在系统中构成的组合;  $h$  为贴现率;  $C_{F-n}$  为固定管理和运行成本;  $P_n$  为供给单元在能源系统中的装机容量;  $M$  为月份数;  $C_{V-i}$  为变动管理和运行成本;  $C_{FF-i}$  成本燃料成本;  $C_E$  成本二氧化碳排放的补贴成本;  $\lambda_c$  为成本二氧化碳排放因子;  $\Delta_m$  为成本供能时间;  $P_{i,m,t}$  为成本第  $t$  年中  $m$  个月系统的供能量。

为了提高综合能源系统的效益环境,将最小化二氧化碳排放量作为第 2 个目标函数,即

$$\min C_e = \sum_{i \in T} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} [C_{CO_2-i} P_{i,m,t} \Delta_m] \quad (3)$$

式中  $C_e$  为二氧化碳排放量;  $C_{CO_2-i}$  为二氧化碳排放量在第  $i$  个能源供给单元中对应的转化系数。

这 2 项目标之间互相制约,为优化决策,利用后悔函数能够较好地逼近多目标理想值,由此确定多目标函数的权重  $r$ 。

### 2.2 约束条件

1) 电力系统约束。电压平衡和功率平衡均属于电力系统的约束,可描述为

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum P_g - P_{D,i} - V_i \sum V_j \cdot \\ \quad (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = \sum Q_g - Q_{D,i} - V_i \sum V_j \cdot \\ \quad (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ -P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \\ V_{ij}^{\min} \leq V_{ij} \leq V_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $P_i$  为节点  $i$  在系统中对应的有功功率;  $V_i$  为节点  $i$  在系统中对应的电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  均为节点  $i$ 、 $j$  在系统中存在的线路导纳;  $\theta_{ij}$  为线路角度;  $Q_i$  为节点  $i$  在系统中对应的无功功率。

2) 热力系统约束。热量在热力网络中的平衡约束为

$$\Delta Q_i = W_{Li} - Q_e = 0 \quad (5)$$

式中  $Q_e$  为热负荷, 由换热器提供;  $W_{Li}$  为额定热负荷。

热力网络在系统中的约束为

$$\begin{cases} G_{ij}^{\min} \leq G_{ij} \leq G_{ij}^{\max} \\ T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $T_i^{\min}$ 、 $T_i^{\max}$  分别为热网节点的温度下限和上限;  $G_{ij}^{\min}$ 、 $G_{ij}^{\max}$  分别为管道工质流量的下限和上限。

### 2.3 求解算法

通过和声搜索算法<sup>[13-14]</sup>对目标函数进行求解, 实现能源互联网的规划, 具体过程如下。

1) 基于数字孪生的能源互联网规划目标函数可以表示为

$$\min F = (rC, (1-r)C_e) \quad (7)$$

2) 通过能源供给单元容量  $H_{MS}$  的自变量  $x$  构建和声记忆矩阵:

$$\mathbf{H}_M = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_1^{H_{MS}^{-1}} & x_2^{H_{MS}^{-1}} & \cdots & x_{N-1}^{H_{MS}^{-1}} & x_N^{H_{MS}^{-1}} \\ x_1^{H_{MS}} & x_2^{H_{MS}} & \cdots & x_{N-1}^{H_{MS}} & x_N^{H_{MS}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3) 改进和声记忆矩阵。通过随机选择、调距机构和记忆考虑系统对和声记忆矩阵  $\mathbf{H}_M$  进行改进, 获得新的单元容量和声矢量  $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 。

① 根据和声记忆矩阵的取值范围  $k = \{1, 2, \dots, H_{MSM}\}$  确定和声矢量  $\mathbf{x}'_i$ ;

② 在能源供给单元  $H_{MCR}$  中随机更新和声矢量  $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ , 并初始化处理和声记忆  $\mathbf{H}_M$

矩阵<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{x}'_i \leftarrow \begin{cases} \mathbf{x}'_i \in \{x'_1, x'_2, \dots, x_i^{H_{MS}}\}, H_{MCR} \\ \mathbf{x}'_i \in X_i, (1 - H_{MCR}) \end{cases} \quad (9)$$

③ 调整参数  $P_{AR}$ , 即

$$\mathbf{x}'_i \leftarrow \begin{cases} 1, & P_{AR} \\ 0, & 1 - P_{AR} \end{cases} \quad (10)$$

4) 更新和声记忆矩阵。在和声记忆矩阵  $\mathbf{H}_M$  中, 当最差和声劣于和声矢量  $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  时, 和声记忆矩阵  $\mathbf{H}_M$  将会引入新的和声, 删除最差和声。

5) 暂停标准。重复上述步骤, 当获取目标函数最优解时停止寻找, 通过最大数定义, 停止寻找后输出目标函数最优解, 实现能源互联网的规划, 完成能源互联网数字孪生系统的设计。

## 3 实验与结果

为验证“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统设计系统的整体有效性, 需要对其进行相关测试。分别采用“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统设计、文献[3]、[4]系统进行测试, 对比这3种系统的燃气、水和电消耗量, 测试结果如图3所示。

根据图3数据可知, 本文所设计系统在运行过程中的燃气、水和电消耗量均低于文献[3]、[4]系统的燃气、水和电消耗量。表明本文所设计系统的有效性高, 主要是由于本文系统在数字孪生的基础上设计了能源互联网规划模型, 有效地降低了系统的燃气、水和电消耗量。

为了验证本文所设计系统、文献[3]、文献[4]系统对能源互联网的规划效果, 对比这3种系统的蓄电池容量, 如图4所示。由图4可知, 本文所设计系统的蓄电池容量在多次迭代过程中均高于文献[3]、[4]系统设计的蓄电池容量, 表明本文所设计系统对能源互联网的规划效果更好。

通过切负荷率对本文所提系统、文献[3]、[4]系统的能源供需平衡进行分析, 切负荷率越高表明系统的能源供需越平衡。设置8种不同的环境, 环境1~4分别为模拟A地区春夏秋冬四季中第2个月份所处的环境; 环境5~8分别为模拟B地区春、夏、秋、冬四季中第2个月份所处的环境。对系统应用在各环境下进行测试, 结果如表1所示。

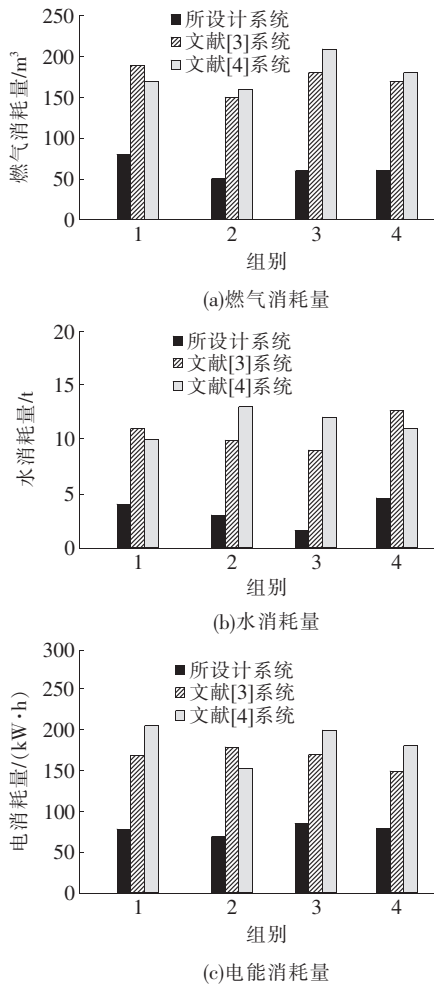


图 3 燃气、水、电能消耗量对比结果

Figure 3 Comparison results of gas, water and power consumption

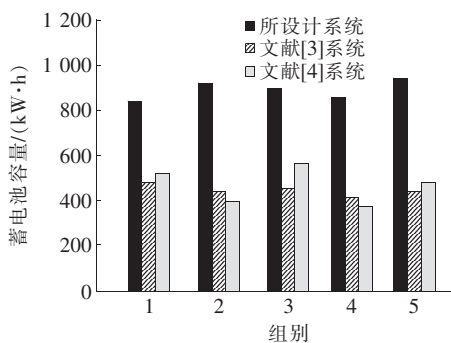


图 4 不同系统的蓄电池容量

Figure 4 Battery capacity of different systems

根据表 1 中的数据可知,在不同环境下本文所提系统的切负荷率均高于文献[3]、[4]系统的切负荷率,表明本文所提系统可以实现能源供需平衡。

本文所提系统对能源互联网进行规划,为了验证系统的有效性,对比规划前、后系统的弃风率,测试结果如图 5 所示,可知规划后系统的弃风率较规

划前明显得到了提升,表明规划后的系统性能得到提升,进一步验证了本文所提系统的有效性。

表 1 不同系统的切负荷率

Table 1 Load shedding rate of different systems

环境	切负荷率/%		
	本文所提	文献[3]	文献[4]
1	16.8	10.3	9.8
2	16.6	10.2	9.9
3	16.7	10.0	10.0
4	17.0	10.1	9.7
5	16.9	10.3	9.7
6	17.1	10.2	10.2
7	16.5	9.9	10.3
8	17.8	10.4	9.9

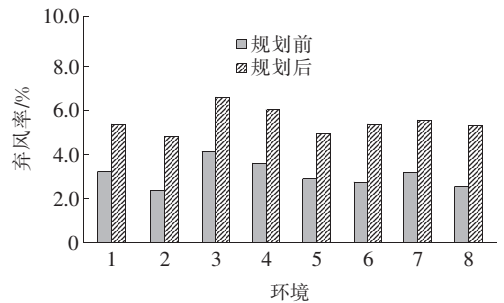


图 5 规划前、后的系统弃风率

Figure 5 System abandonment rate before and after planning

## 4 结语

为响应国家节能减排的号召,解决能源消耗和供需不平衡等问题,提出“双碳”背景下能源互联网数字孪生系统设计。通过设计能源互联网数字孪生系统框架,从二氧化碳排放量和容量投资成本两个目标出发,构建目标函数,并利用和声搜索算法求解,实现能源互联网的规划,完成系统设计。实验结果表明,本文所设计系统的燃气消耗量、水消耗量和电消耗量均低于其他方法,可以达到较高的蓄电池容量,实现了能源供需平衡。

## 参考文献:

[1] 赖伟坚,陈威洪,林泽宏,等. 能源互联网内多类设备协同运行的能量管理系统软件设计[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(4):72-80.  
LAI Weijian, CHEN Weihong, LIN Zehong, et al. The software design of energy management system for the



- collaborative operation of multiple types of devices in the internet of energy[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(4): 72-80.
- [2] 孙荣富, 王隆扬, 王玉林, 等. 基于数字孪生的光伏发电功率超短期预测[J]. *电网技术*, 2021, 45(4): 1258-1264.  
SUN Rongfu, WANG Longyang, WANG Yulin, et al. Ultra-short-term prediction of photovoltaic power generation based on digital twins[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(4): 1258-1264.
- [3] 陈志鼎, 梅李萍. 基于数字孪生技术的水轮机虚实交互系统设计[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(9): 167-170.  
CHEN Zhiding, MEI Liping. Design of virtual real interaction system of hydraulic turbine based on digital twin technology[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(9): 167-170.
- [4] 张鹏, 冯浩, 杨通达, 等. 数字孪生与 TRIZ 集成迭代参数演化创新设计过程模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1361-1370.  
ZHANG Peng, FENG Hao, YANG Tongda, et al. Innovative design process model of TRIZ and digital twin integration iterative evolution based on parameter deduction[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(6): 1361-1370.
- [5] 向峰, 黄圆圆, 张智, 等. 基于数字孪生的产品生命周期绿色制造新模式[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1505-1514.  
XIANG Feng, HUANG Yuanyuan, ZHANG Zhi, et al. New paradigm of green manufacturing for product life cycle based on digital twins[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(6): 1505-1514.
- [6] 刘彬, 张云勇. 基于数字孪生模型的工业互联网应用[J]. *电信科学*, 2019, 35(5): 120-128.  
LIU Bin, ZHANG Yunyong. Application of digital twin model based industrial internet[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(5): 120-128.
- [7] 雷煜卿, 仝杰, 张树华, 等. 能源互联网感知层技术标准体系研究[J]. *供用电*, 2021, 38(7): 14-20+33.  
LEI Yuqing, TONG Jie, ZHANG Shuhua, et al. Research on technical standard system of energy internet sensing layer[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(7): 14-20+33.
- [8] 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.
- [9] 杨天蒙, 韩震焘, 史喆, 等. 能源互联网系统中复合储能协调优化配置方法研究[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(5): 8-13.  
YANG Tianmeng, HAN Zhentao, SHI Zhe, et al. Coordinated optimal configuration method of hybrid energy storage in energy internet system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(5): 8-13.
- [10] 张海静, 杨雍琦, 赵昕, 等. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J]. *中国电力*, 2021, 54(4): 141-150.  
ZHANG Haijing, YANG Yongqi, ZHAO Xin, et al. Two-level optimal dispatching strategy for regional integrated energy system considering demand response[J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 141-150.
- [11] 董文杰, 田廓, 陈云斐, 等. 能源互联网下基于博弈与证据理论的综合能源系统评价方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(7): 73-80.  
DONG Wenjie, TIAN Kuo, CHEN Yunfei, et al. Evaluation method of comprehensive energy system based on game theory & evidence theory under energy internet[J]. *Smart Power*, 2020, 48(7): 73-80.
- [12] 钟晓芳, 兰红娟, 江文奇. 共识驱动的区间直觉模糊型多准则群体决策信息融合模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(7): 1558-1566.  
ZHONG Xiaofang, LAN Hongjuan, JIANG Wenqi. A consensus-driven interval intuitionistic fuzzy multi-criteria group decision-making information fusion model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(7): 1558-1566.
- [13] 张健, 陈锐, 陈世瑛, 等. MMC 子模块设备老化机理与状态监测研究综述[J]. *高压电器*, 2020, 56(1): 1-8.  
ZHANG Jian, CHEN Rui, CHEN Shiyong, et al. Review on aging mechanism and condition monitoring of devices in mmc sub-module[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(1): 1-8.
- [14] 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): 180-186.  
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): 180-186.
- [15] 罗珊珊, 冷佳. 基于数字孪生机房的三维可视化监控系统的设计与实现[J]. *计算技术与自动化*, 2021, 40(1): 135-139.  
LUO Shanshan, LENG Jia. Design and implementation of 3D visual monitoring system based on digital twin computer room[J]. *Computing Technology and Automation*, 2021, 40(1): 135-139.