

计及源荷不确定性和多类储能响应的 园区 IES 多目标优化调度模型

吕振华¹, 李 强¹, 韩华春¹, 赵宇鑫², 马 瑞²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:考虑综合能源系统形态与运行特点的变化,提出一种计及源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统多目标调度模型。首先,建立综合能源系统分布式风电和电热气负荷不确定模型以及确定电、气、热多类储能激励和价格需求响应模型;其次,以电、气能源购买、弃风和环境污染成本等多目标函数优化,在源荷侧不确定性和多类储能需求响应下,考虑多类能源功率平衡、冷热电系统之间转化耦合等约束条件,建立综合能源系统源荷储多目标优化调度模型,并采用多目标粒子群优化算法(PSO)对所构建模型优化求解;最后,采用园区能源系统算例对文中模型进行仿真,结果表明其正确有效,该模型可为园区综合能源源荷储需求互济服务提供新的策略。

关 键 词:综合能源系统;双向不确定性;储能;需求响应;多目标优化调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.005 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2021)02-0040-11

Multi-objective optimal scheduling model for IES in parks considering source and load uncertainties and multiple type of energy storage responses

LV Zhenhua¹, LI Qiang¹, HAN Huachun¹, ZHAO Yuxin², MA Rui²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The construction and component of integrated energy system has changed with fast development of new energy emergence. Under the background, a multi-objective scheduling model is proposed which takes into account source and load uncertainty and multiple types of energy storage demand response. Firstly, an uncertain model of distributed wind power and electric heating gas load is established. The multiple types of energy storage incentives and price demand response models of electricity, gas and heat are then determined. Secondly, the purchase cost of electricity and gas energy, the cost of abandoning wind and the cost of environmental pollution are chosen as the objective of multi-objective optimization. Under the uncertainty of source & load side and the response of multiple types of energy storage demand, the constraints of multiple types of energy power balance, conversion and coupling between cooling and heating systems are considered to establish a source, grid and storage multi-objective optimal scheduling model for integrated energy system. Then the multi-objective Particle Swarm Optimization algorithm is utilized to optimize the constructed model. Finally, a park energy system is simulated. The results show that the proposed optimization is effective. The model can provide a new strategy for the mutual energy service of the parks comprehensive energy source storage and demand.

Key words: integrated energy system; bidirectional uncertainty; energy storage; demand response; multi-objective optimal scheduling

收稿日期:2020-03-18;修回日期:2020-06-19

基金项目:国家自然科学基金(51977012,51677007);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019047)

通信作者:马 瑞(1971-),男,博士,教授,主要从事电力系统分析与控制、能源互联网及电力市场的研究;E-mail:marui818@126.com

随着新能源的高比例渗透,园区综合能源系统(Integrated energy system, IES)的形态和运行特征正在发生变化^[1-2]。传统的单一能源系统运行模式已不能满足多样的负荷需求,为实现园区 IES 的整体减排降碳的目标,研究人员在 IES 规划、能源互补、协调运行^[3-4]等研究领域提出许多策略与方法。因此,计及园区分布式电源^[5]和电气热多能负荷的双向不确定性,有效发挥多类储能需求响应^[6](demand response, DR)的灵活作用,利用园区内可调度资源提升和平抑不确定能源^[7]供电能力及波动情况,通过源荷储多目标协同优化实现园区 IES 降本增效已成为能源消费革命的主要措施。

传统的园区 IES 调度运行采用需求侧能量管理方式,DR 则被认为颠覆传统用能模式的关键技术。一方面,DR 资源依靠自身的稳定性与灵活性优化园区各类能源配置^[7];另一方面,DR 资源引入园区 IES 对园区各项运行指标关键设备产生重要影响。针对 DR 的研究,文献[8]构建了计及分时电价负荷响应和压缩式制冷机参与的智能园区多能流微网联合调度模型,该模型未考虑储能响应对智能园区内关键设备的影响;文献[9]研究园区内能源转换设备对综合能源系统可靠性影响分析,未考虑多储能响应对其自身转换设备运行产生的影响;文献[10]研究设计一种考虑节点与链路业务承载能力的动态负载均衡模型,该模型解决园区与配网大需求传输的问题,同样,该模型未考虑储能参与园区与配网交互传输过程中对交互功率产生的影响。因此,研究多类储能参与园区 IES 优化调度运行至关重要。

对于园区内源荷输入输出特征,一般通过构建多种不确定模型^[11-14]表征分析,然而大多研究未同时考虑源荷双向不确定性对园区 IES 能源调度优化产生的重要影响。其中,文献[11]提出一种计及用户参与不确定性的 DR 模型,以应对园区网侧对负荷削峰填谷的需求;文献[12]提出的微网系统双层调度优化模型在一定程度上提高可再生风能的利用率;文献[13]考虑用户侧不确定 DR 资源作为备用容量,提出调度与备用成本最小为目标函数的两阶段鲁棒优化模型,有效促进风电消纳及降本增效;文献[14]研究考虑 PEI 接入园区 IES 系统对其配

网规划的影响,减少运行投资成本和对负荷需求起到削峰填谷的效果。同时,园区管理者在各优化调度环节,为节约能量管理成本,建立多种目标优化模型。其中,文献[15]构建用户舒适度及园区供需平衡双层多目标优化模型,提高园区的经济效益。文献[16-17]针对居民 DR 的售电公司运行情况,建立购售电能收益最大化为优化目标的日前市场势博弈决策模型,该模型可有效降低园区用户购电成本;文献[18]在文献[19]基础上建立多能流系统的经济—节能双目标最优运行模型,实现不同能源的多能互补和梯次利用;文献[20]为满足用户多能负荷实时需求,提出一种考虑多设备最优能流路径的运行优化方法。但以上目标函数模型多集中在经济效益方面,在多储能响应参与园区 IES 优化过程中,未综合考虑经济、可靠、环保等多因素产生的影响。

为此,该文提出一种计及源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统多目标优化模型。首先,建立 IES 分布式风电和电热气负荷源荷不确定模型,确定电、气、热储能激励和价格响应模型。其次,以电和气能源购买成本、弃风成本和环境污染成本等多目标优化兼顾源荷侧不确定性和多类储能需求响应,考虑多类能源功率平衡、冷热电系统之间转化耦合等约束条件,建立综合能源系统源荷储多目标协同优化模型;进而采用多目标粒子群优化算法求解模型。最后,通过区域能源系统算例仿真及结果验证文中模型正确有效,该模型为园区 IES 源荷储需求互济服务提供了新的有效策略。

1 IES 源荷不确定模型和多类储能响应模型

1.1 综合能源系统源荷不确定模型

该文暂以园区综合能源系统接入的分布式风电不确定性考虑源侧不确定性。假定风速服从 Weibull 分布^[5],且研究表明当日不同时段的风速发生的概率密度与威布尔分布形状 k 和尺度参数 c 有关。且在已知风速概率函数 $f_{k,c}(v)$ 的情况下,风机出力 P_w 处于 3 种运行状态,当环境风速 v 小于允许最小风机投切风速 v_{in} 时,风机输出功率值 0;当环境风速大于允许最大风机投切风速时,风

机输出功率值为日前风机平均出力 P_B ；当环境风速处于风机允许投切风速时，风机输出功率为

$$P_w(t) = a \left(\pm \sqrt{\frac{1}{\ln((\sqrt{2\pi} \cdot f_{k,c}(\nu, t))^2)}} \right) + bP_B(t) \quad (1)$$

式中 a, b 为可再生风电出力不确定性系数。

针对园区电、气、热等不同类型负荷的不确定性及其需求响应不确定性进行如下考虑。考虑电负荷要求响应速度快，满足需求精度高，但同时也需要降低用电成本，提高用电效率；热负荷不要求响应速度和精度，需要提供最佳的用户体验和经济效益；气负荷对于环境要求就为严格，需要为用户提供环保高效安全的气源支撑即可。

对于园区内用电负荷可分为刚性、可中断、可转移负荷等^[21-23]。对于刚性负荷需要提供最优先级的负荷服务，对于可中断负荷可以提供志愿行为服务，对于可转移负荷可以通过优化用电周期内用能模式。该文重点研究可转移用电负荷需求响应，根据可转移负荷的用电特征，建立不确定电负荷模型：

$$P_E(t) = P_{BE}(t) + f_{P_{BE}}^{-1} \sigma_E \quad (2)$$

式中 $P_E(t)$ 为电负荷 t 时刻实际需求电量； $P_{BE}(t)$ 为电负荷日前 t 时刻需求均量；且 $f_{P_{BE}}$ 服从正态分布； σ_E 为电负荷不确定需求度；即 σ_E 为日前各时段负荷需求量数值的均值。

园区内热负荷和气负荷不确定建模方法与电负荷需求建模方法一致，假设热负荷和气负荷均服从正态分布，即 $P_G \sim N(P_{BG}, \sigma_G)$ 和 $P_H \sim N(P_{BH}, \sigma_H)$ 。因此，建立热负荷和气负荷不确定数学模型：

$$P_G(t) = P_{BG}(t) + f_{P_{BG}}^{-1} \sigma_G \quad (3)$$

$$P_H(t) = P_{BH}(t) + f_{P_{BH}}^{-1} \sigma_H \quad (4)$$

综上，建立园区综合能源系统不确定模型，通过选取某一区间内各时段的随机参数来表征供给侧风电和需求侧电气热多类负荷双向不确定性。

1.2 多类储能响应模型

针对园区内综合能源系统源荷不确定，引入电、气、热多类储能的价格激励需求响应机制解决可再生风电消纳和负荷峰谷用能不协调之间的矛盾。因此，在构建多类储能响应模型时，考虑存储单元的容

量和充放能限制等因素，引入存储弹性因子 σ_i ，则 t 时刻 i 类储能单元实际响应功率为

$$P_i(t) = P_{f,i}(t) + \sigma_i \Delta P_1 + (W_{out} - W_{in}) \quad (5)$$

$$E_i(t+1) =$$

$$(1 + \gamma)E_i(t) + \Delta t(\eta_{in}W_{in} - \frac{W_{out}}{\eta_{out}}) \quad (6)$$

式中 $P_{f,i}(t)$ 为 i 型储能响应日前各时段平均出力； $\Delta P_i(t)$ 为 i 型储能响应日前出力偏差； W_{in}, W_{out} 分别为储能单元 Δt 时间内的充放能功率； $E_i(t)$ 为 i 类型 t 时刻储能单元的存储容量； γ 为储能单元的自损率，不同类型的储能单元自损率不同， η_{in}, η_{out} 分别为储能单元的能量充放效率。

基于 3 种需求响应机制建立多类储能出力数学模型为

$$P_{st}(t) = \beta_1 P_R(t) + \beta_2 P_M(t) + \beta_3 P_U(t) \quad (7)$$

式中 $P_{st}(t)$ 为典型日内可调度资源出力； $P_R(t)$ 为常规需求响应出力； $P_M(t)$ 为重大保供电时期需求响应出力； $P_U(t)$ 为紧急需求响应出力； $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为对应需求响应下的占比情况。将带有弹性因子的各类需求响应加入典型日可调度出力模型中即可表征多类储能响应情况。

2 兼顾源荷不确定和多类储能响应的综合能源系统多目标优化调度模型及算法

2.1 兼顾源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统架构

完整的园区综合能源系统框架应包括输入侧的供给源、输出侧的多种负荷需求以及包括各能源存储单元和能量转换设备的传输层。因此，基于能源节点构建兼顾源荷不确定性和多类储能需求响应的园区综合能源系统架构如图 1 所示，其中，在 IES 源侧建立考虑不确定性的风电出力 P_w 模型，配电网向园区提供基于价格型 DR 的可调度资源以及气网提供持续稳定的天然气资源；在园区系统输出侧建立可转移电负荷、气负荷、热负荷不确定模型；在园区系统传输层建立多类储能响应模型以及各类能源转化设备，包括 CHP 联供机组模型、燃气锅炉模型、燃气轮机模型^[9]等。

基于园区内各能源系统运行机理及系统运行架

构,在负荷需求侧,满足电负荷需求的可调度资源包括源侧电网和风电出力直接供电,储能单元充放电响应以及通过能源转换供给的 CHP 机组出力,建立电负荷需求响应模型:

$$P_E(t) = P_{EN}(t) + P_W(t) + P_{st}(t) + P_{CHP}(t) \quad (8)$$

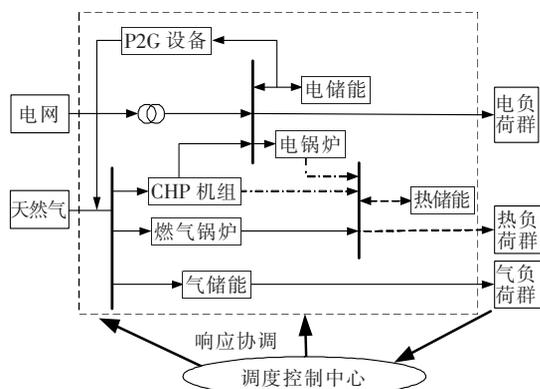


图 1 兼顾源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统架构

Figure 1 Schematic diagram of an integrated energy system that takes into account source-charge uncertainty and multi-class energy storage DR

满足热负荷需求的可调度资源包括燃气锅炉产生的热能 P_{GH} 、储热单元释放的 P_{st} 以及 CHP 机组出力通过能源转换生成热能 P_{CHP-H} , 建立热负荷需求响应模型:

$$P_H(t) = P_{GH}(t) + P_{st}(t) + P_{CHP-H}(t) \quad (9)$$

满足气负荷需求的可调度资源包括天然气网直接供给 P_{GN} 、电转气设备供给能源以及储气单元充放的能量,建立气负荷需求响应模型:

$$P_G(t) = P_{GN}(t) + P_{st-g}(t) + P_{EH}(t) \quad (10)$$

式中 P_{st-g} 为储气单元输出功率; P_{GN} 为天然气网输出功率; P_{EH} 电转气设备输出功率。

2.2 兼顾源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统多目标优化调度模型

构建园区综合能源系统源荷储多目标调度优化模型的目的是实现可再生能源消纳、负荷削峰填谷及平抑负荷波动,减少环境污染,降低用能成本,产生更高的经济效能。

因此,建立兼顾源荷不确定性和多类储能响应优化模型的总目标函数 F ,该目标函数主要由园区

IES 向配电网购电成本 C_{EN} 、天然气网购气成本 C_{GN} 、可再生风电的弃风成本 C_w 以及燃气锅炉燃气释放 CO_2 温室气体造成的环境污染成本 C_H 组成,其标准形式为

$$\begin{aligned} & \{F = \min \{C_{EN}, C_{GN}, C_w, C_H\} \\ & \text{s. t. } g(x) \geq 0 \\ & \quad h(x) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $g(x)$ 为不等式约束条件; $h(x)$ 为等式约束条件。

为争取园区用户用能效益最大化,合理规划园区综合能源系统在调度周期内购售电计划,建立购电成本函数:

$$C_{EN} = \sum_{t=1}^{T'} p_{EN}^{\text{in}}(t) P_{EN}(t) + \sum_{t=T'}^T p_{EN}^{\text{out}}(t) P_{EN}(t) \quad (12)$$

式中 T 为调度周期; T' 为调度周期内购电总时段; $p_{EN}^{\text{in}}(t)$ 为 t 时段园区向配电网实时购电电价; $p_{EN}^{\text{out}}(t)$ 为 t 时段园区向配电网实时售电电价。

建立天然气购买成本函数:

$$C_{GN} = \mu \sum_{t=1}^T p_{GN}(t) P_{GN}(t) \quad (13)$$

式中 μ 为天然气传输过程中损耗系数; $p_{GN}(t)$ 为 t 时段园区向天然气网购买天然气的价格; $P_{GN}(t)$ 为 t 时段园区购买天然气量。

弃风成本在园区综合能源系统功率平衡维持过程中产生,因此,需要建立可再生风电弃风成本函数:

$$C_w = \sum_{t=1}^T p_w (P_w(t) - P_E(t)) \quad (14)$$

式中 p_w 为弃风成本系数。

建立环境污染成本函数:

$$C_H = \rho \sum_{t=1}^T p_{CO_2} P_{GE}(t) \quad (15)$$

式中 ρ 为燃气锅炉和燃气轮机在生产过程中单位天然气释放 CO_2 量; p_{CO_2} 为 CO_2 价格系数; $P_{GE}(t)$ 为 t 时段时损耗的天然气量。

2.3 考虑源荷不确定和多类储能响应的约束条件

考虑兼顾源荷不确定性和多类储能需求响应的综合能源系统多目标优化模型等式约束条件有电、

热、气负荷需求响应平衡约束条件(式(8)~(10))以及多类储能充放电平衡约束条件(式(6))。

对于多目标函数的不等式约束条件需要满足:能源转换设备运行不等式约束条件模型^[1],其中,包括电转气设备、燃气轮机、燃气锅炉启停次数以及电转气、电制冷、热制冷输出功率上下限等不等式约束条件;另外,线路输送限制包括天然气输送功率上下限及园区与配网交互功率上下限等。由于文章篇幅限制和相关文献已给出不等式约束条件模型,此处就不一一赘述。

2.4 多目标优化调度模型具体求步骤

该文构建的优化模型为非线性模型,包含多个待优变量,解决多目标优化问题,求解过程较为复杂,基于上述情况,采用改进的多目标粒子群优化算法对其构建模型进行求解,具体流程如下。

1)随机选取源荷预测初始值,确定粒子群中粒子矩阵 \mathbf{A} 。根据模型所需确定粒子矩阵中的待优化变量,即燃气轮机输出功率 P_{gas} 、燃气锅炉输出功率 P_{Boi} 、热制冷输出功率 P_{HC} 、储气容量 E_{G} 、园区与电网交互功率 P_{gd} 、储电单元充放电功率 P_{SE} 、电转气输出功率 P_{EG} 、储热容量 E_{H} 、电制热输出功率 P_{EC} ,共计 9 个待优变量。

2)随机给粒子矩阵 \mathbf{A} 中的待优变量赋初值,根据式(16)确定粒子位置 A_i 和速度 V_i ,保证每个粒子的待优化变量均在可行域范围内,即满足运行的所有约束条件。联络线功率约束条件、能源网与电网交互的电功率、储能峰谷差约束条件、储能容量约束条件及电转气、电制冷约束条件:

$$\begin{cases} a_i(t+1) = a_i(t) + v_i(t+1), t \in T \\ \begin{cases} v_i(t+1) = v_i(t)\bar{\omega} + \frac{c_1 + c_2}{2}r_{12}(p_{\text{gt}}(t) - a_i(t)) \\ \quad + c_3r_3(p_{\text{qt}}(t) - a_i(t)) \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

式中 c_1 、 c_2 、 c_3 为加速因子; $\bar{\omega}$ 为权重系数; r_{12} 、 r_3 为 0 到 1 之间的随机变量; $p_{\text{gt}}(t)$ 为个体最优解粒子; $p_{\text{qt}}(t)$ 为全局最优解粒子, i 表示粒子数;

3)将流程 1 中 9 个待优化变量初始值分别代入目标适应度函数,计算每个待优变量对应的目标函数值 C_1 、 C_2 、...

4)更新每个粒子所对应的 p_{gt} 和 p_{qt} 。每个粒子对应的全局极值根据按区择优^[3]的全局最优解选取的方法确定,即通过将全局优化坐标平面划分成若干个扇形区间,外部档案中的点与坐标原点组成外部档案向量,外部向量角按大小次序归入相应的扇形区间,粒子与坐标原点组成的粒子优化向量落入相应扇形区间,该区间内的外部档案点即为全局最优点;个体最优解根据就近择优的个体最优解选择的方法确定,即通过在个体外部粒子中选取与粒子向量角最接近的作为个体最优点。

5)基于 Pareto 最优解模型,根据实际调度运行情况,得到新的非劣解集,并更新非劣解集矩阵,输出当前粒子及非劣粒子的位置及相应目标函数值,停止迭代程序;如果不满足上述条件,则转步骤 3。

6)记录全局极值和个体极值,输出调度周期内的 9 个待优变量。

3 算例仿真及其结果分析

3.1 算例系统参数

为验证所提模型的有效合理性,该文选取国内某园区综合能源系统调度周期($T=24$)内的历史数据进行算例仿真分析。首先,提取园区内源、荷、储日前调度数据,根据构建的源荷不确定模型对园区可再生风电的出力情况和电、气、热负荷进行预测分析,假设可再生风电出力波动误差为 $\pm 20\%$,负荷响应误差为 $\pm 10\%$,算例中采用考虑不确定性源侧风电出力和荷侧电热气负荷群响应预测值,如图 2 所示;其次,根据能源市场自由交易原则,算例中园区用户向配电网购售电价和可再生风电弃风成本电价均采用实时电价模型,如图 3 所示;最后,园区用户向天然气网购买能源交易单价和环境污染成本单价均采用累计功率分层电价模型,模型具体形式如图 4 所示。

此外,园区内其他能源转换存储设备的参数设定如表 1、2 所示。最后,利用 Matlab 仿真平台通过粒子群优化算法对兼顾源荷不确定性和多类储能响应的 IES 多目标优化模型进行有效性验证,其中,粒子群算法的最大迭代次数取 100,种群规模 N 取

50, 加速因子 c_1, c_2, c_3 分别取 1.5、1.5、0.01, 最大权重 w_{\max} 和最小权重 w_{\min} 分别取 0.9 和 0.4, 调度间隔取 1 h。

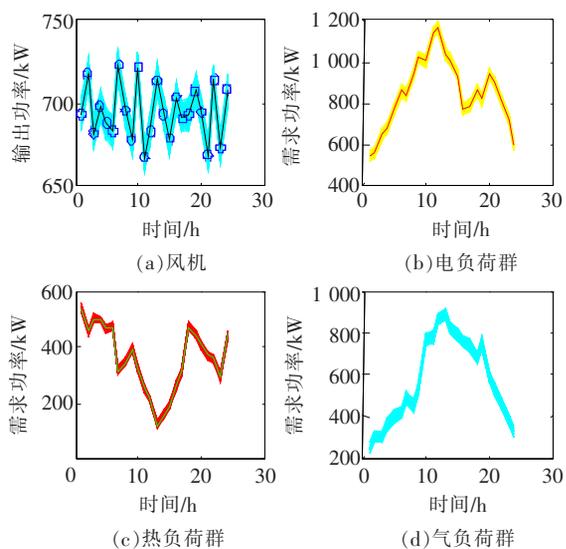


图 2 某园区 IES 考虑不确定性源侧风电出力和荷侧电、热、气负荷群响应预测

Figure 2 IES in a park considering the uncertainty of source-side wind power output and load-side electric heat gas load group response prediction

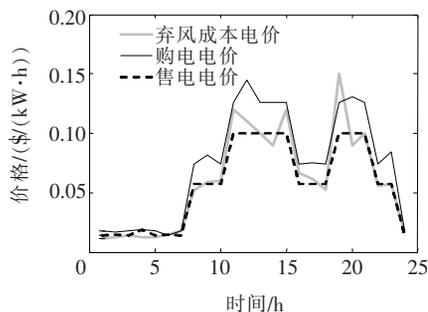


图 3 某园区 IES、售电、弃风成本交易实时电价

Figure 3 Real-time electricity prices for IES power purchase, sales, and wind abandonment cost transactions in a park

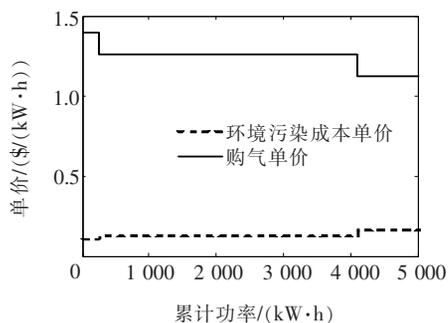


图 4 某园区 IES 购气、环境污染成本累计功率分层电价

Figure 4 Cumulative power tiered electricity prices for IES gas purchase and environmental pollution costs in a park

表 1 园区内能源转换设备参数

Table 1 Parameters of energy conversion equipment in the park

能源转换设备参数	参数取值
电转气系数 R	0.034
气转热系数 Q_{hrs}	0.6
燃气轮机发电效率 η_{GE}	0.6
热制冷效率 C_{opac}	0.8
电制冷系数 C_{opec}	3.0
天然气传输损耗系数 μ	0.45

表 2 园区内储能设备初始参数

Table 2 Parameters of energy storage equipment in the park

储能单元	额定能量/ (kW·h)	最小能量/ (kW·h)	最大能量/ (kW·h)	充放电效率/%	静态能 量效 率/%	初始 能量/ (kW·h)
储电	600	200	580	95	95	450
储气	100	10	90	90	95	50
储热	400	0	450	90	90	0

3.2 算例场景设置及 PSO 算法仿真结果分析

为验证该文构建模型的有效性,设计对比仿真方案进行说明。

场景 1 在园区内构建综合能源冷热电连供系统,该系统为考虑能源转换关系及能源存储响应;

场景 2 在园区供能侧构建分布式风电不确定出力模型,并在园区综合能源系统中考虑能源转换设备,在荷侧建立不确定负荷响应模型,该场景下依旧未考虑多类储能响应;

场景 3 在兼顾源荷不确定性情况下,在园区内构建多类储能响应的综合能源系统多目标优化模型。

经过场景设置及算例仿真分析,得出场景 2、3 的 PSO 算法的收敛性分析结果,如图 5 所示,显示的仿真结果未考虑多类储能响应的 IES 总目标函数最优解迭代寻优过程及考虑多类储能响应的 IES 总目标函数迭代寻优过程。

从图 5 中可以看出,2 个场景下的总目标函数最小值数值在迭代 24 次后处于稳定状态,说明该算法模型具有良好的收敛性。通过图 5 仿真结果得出,对比未考虑多类储能响应的园区综合能源系统

多目标优化和考虑多类储能参与园区综合能源系统多目标优化2种情况,综合计算园区内配网购售电、天然气网购气、可再生风电弃风以及环境污染成本后,总目标函数成本的最小值分别为 1.1120×10^6 、 9.1121×10^5 \$。实验结果说明:多类储能响应参与园区 IES 多目标优化调度可以减少园区系统的成本支出,从而达到降本增效的目标。

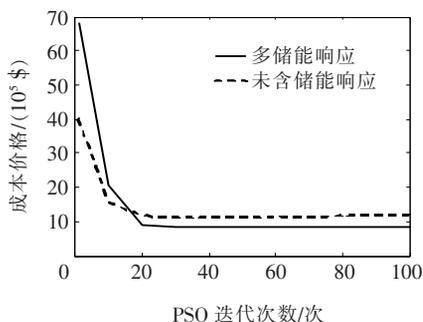


图5 不同场景园区 IES 总目标函数最优解

Figure 5 Optimal solution of IES total objective function in different parks

实验还分别对4种成本函数进行局部优化,得出优化结果如表3所示,可知在未考虑多类储能响应的多目标优化过程中,园区综合能源系统总成本费用较高;由于场景2在电热气负荷需求高的时期没有加入储能设备,使得园区用户只能从配电网或天然气网中购买需求能源,用户在未考虑多类储能响应的情况下,购电成本支出增加了4.97%;由于多类储能参与园区 IES 运行调度,大量的可再生风电被消纳储存在储能单元中,从而减低了可再生风电的弃风成本。

针对源荷双向不确定性设置不同的置信水平,研究对园区 IES 多目标优化调度产生的影响,结果分析如表4所示,其中, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为购能、弃风、环境污染成本函数,可以得出,随着源荷不确定性的置信水平不断提高,购能、弃风、环境污染成本越大,源荷不确定越大,对于园区 IES 弃风成本的影响明显,对环境污染成本影响不太明显。由于源侧风电出力与负荷侧需求响应双向不确定性增加,导致风电输出功率相对减少,弃风成本明显增加,购电功率增大,购电成本增加。园区 IES 各能源设备(燃气锅炉和燃气轮机)输出功率基本保持不变,所以环境污染成本增加不太明显。

表3 2种场景方案的各项成本费用组成

Table 3 Composition of various costs in two scenarios 10^5 \$

场景	成本				总成本
	购电	购气	风电弃风	环境污染	
多类储能响应	4.154 9	3.638 2	-2.042 2	3.361 2	9.112 1
未含多类储能响应	4.361 3	3.338 4	1.010 9	3.381 2	12.091 8

表4 源、荷不确定性不同置信水平对多目标的影响结果

Table 4 The effect of different confidence levels of source and charge uncertainty on multi-objectives

不确定度置信水平/%		多目标优化调度结果/(10^5 \$)		
源	荷	f_1	f_2	f_3
5	5	7.52	0.40	9.04
10	5	7.61	0.98	9.05
15	10	7.86	1.84	9.11
20	10	7.79	2.04	9.11

3.3 多类储能响应对园区综合能源系统优化调度仿真结果的影响

当多类储能响应参与园区综合能源系统进行多目标调度优化时,各储能单元出力情况如图6所示,兼顾源、荷不确定和多类储能响应的园区综合能源系统多目标优化模型对园区系统调度影响主要包括:源侧机组出力和荷侧各类负荷需求响应情况。

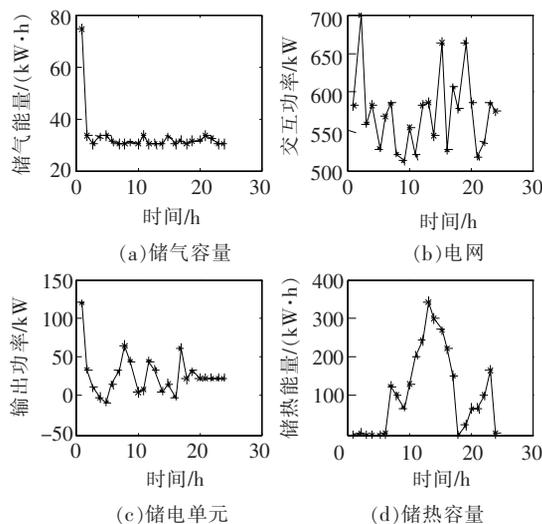


图6 各类储能响应情况及电网交互功率

Figure 6 Various energy storage response situations and interactive power between the park and the distribution network

1) 对源侧机组出力的影响分析。

根据仿真模型采集优化调度过程中数据,得出园区内燃气轮机1、2和燃气锅炉以及热制冷响应负荷出力变化情况,如图7(未含多类储能)、8(多类储能响应)所示。

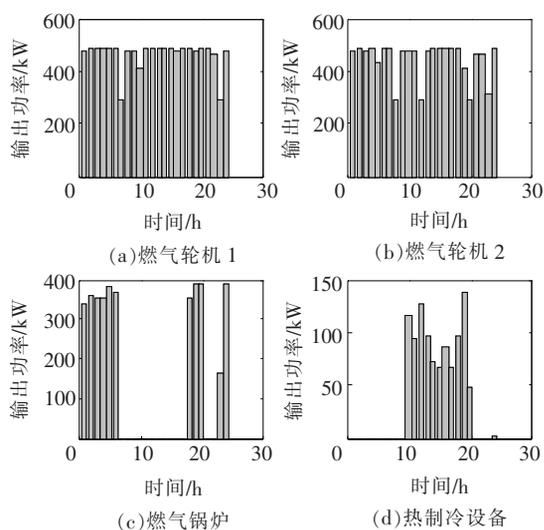


图 7 未考虑多类储能响应的园区 IES 源侧燃气轮机、燃气锅炉、制冷设备的出力情况

Figure 7 The output of the IES source-side gas turbine, gas boiler, and refrigeration equipment in the park without considering multiple types of energy storage response

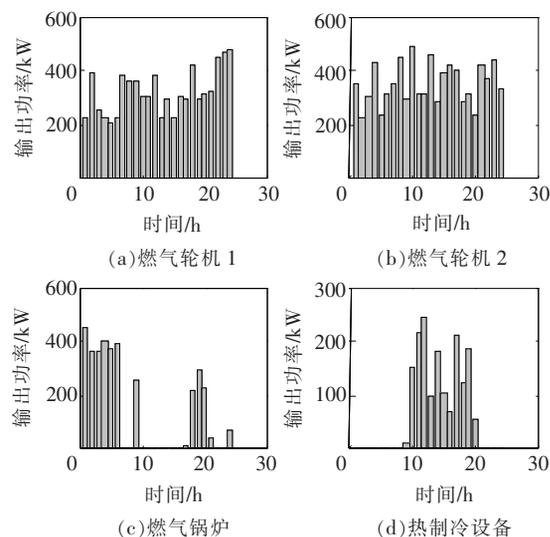


图 8 多类储能响应参与园区 IES 优化调度时燃气轮机、燃气锅炉、制冷设备的出力情况

Figure 8 Multiple types of energy storage respond to the output of gas turbines, gas boilers, and refrigeration equipment when participating in the IES optimal scheduling of the park

通过图 7、8 分析可知,在没有考虑多类储能响应的 IES 调度过程中,燃气轮机 1、2 均处于满发状态,调度周期内各时刻输出功率值达到 500 kW/h;当园区系统增加多类储能响应时,燃气轮机输出功率明显减少,各时段输出功率均低于 400 kW/h,运行在合理的区间内;同理,在未考虑多类储能响应模

型时,由于 00:00—06:00、18:00—24:00 时段热负荷需求较高,10:00—20:00 时段冷负荷需求较大,园区系统通过燃气锅炉供热和热能转化供冷,而且由图 7 可知,燃气锅炉和以热制冷设备必须满负荷运转才能满足各类负荷需求,如果园区系统长此运行,不仅给园区环境造成污染,而且缩短了设备的工作寿命,增加运行成本;在园区系统中加多类储能响应时,对负荷进行削峰填谷,减少供能设备出力。因此,可根据实际园区运行情况,在负荷需求较高时段加入多类储能响应进行功率补偿,以提高园区系统运行安全性。

2) 对荷侧负荷需求响应的影响分析。

在兼顾源荷不确定性和考虑多种电价模型情况下,对比分析在多储能响应和无储能响应的园区多目标调度优化过程中的荷侧能源转换设备的输出功率变化以及园区与配网交互功率变化情况,如图 9、10 所示。

由图 9、10 分析可知,在园区 IES 优化调度过程中,由于未考虑多储能响应情况,电转气设备输出功

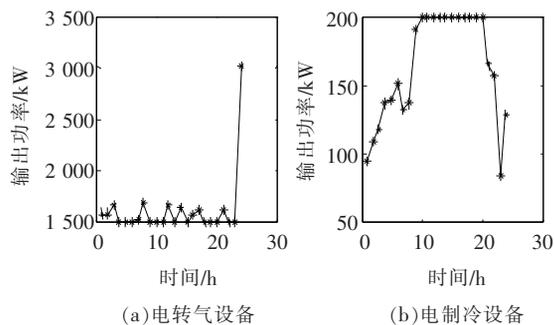


图 9 未考虑储能园区电转气、电制冷的响应情况

Figure 9 The response of electricity-to-gas and electric refrigeration for the park without consideration of energy storage

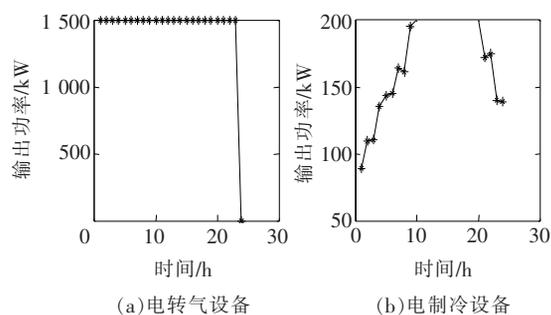


图 10 含储能响应园区电转气、电制冷的出力情况

Figure 10 The electricity to gas and electric refrigeration output of park including energy storage

率曲线和电制冷设备输出功率曲线的波动范围均较大且出力趋于上升状态。电转气设备最低输出功率值为 1 500 kW/h,且调度周期内多个时间段输出功率均高于 1 500 kW/h;在园区 IES 优化调度过程中加入多类储能响应时,电转气设备出力和电制冷设备出力波动情况较未考虑多类储能响应时的出力情况范围变小,设备处于稳定运行状态,且电转气及电制冷设备在多储能响应参与下,累计输出能量值大幅降低。由于多储能参与园区调度优化减少电转气设备输出功率,从而降低了能耗排放。

多类储能响应参与园区综合能源系统多目标调度优化,园区与配网交互功率以及电制热输出功率的变化情况如图 11、12 所示,通过两场景运行情况对比分析可知,园区 IES 在优化调度过程中引入多储能响应机制可以有效降低购能成本,各时段园区

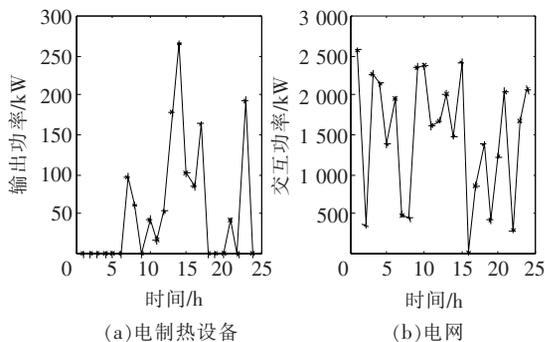


图 11 未考虑储能响应的园区电制冷设备出力及园区与配电网交互功率

Figure 11 Response of electric refrigeration equipment and the interactive power of the park and the distribution network in the park without considering energy storage response

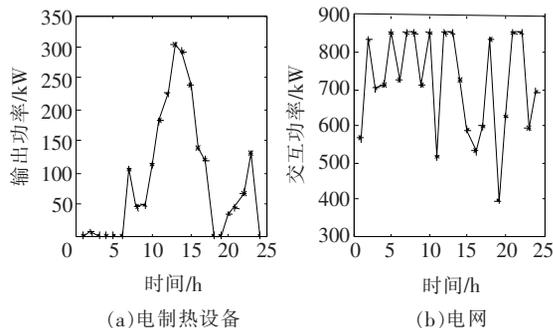


图 12 含多储能响应的园区电制冷设备出力及园区与配电网交互功率

Figure 12 Electrical refrigeration equipment and the interactive power of the park and the distribution network in the park with multiple energy storage response

相配交互功率值均明显低于未引入多储能响应机制前的源网交互功率值,而且向园区供给的电功率上下波动幅度明显降低,波动差值由原来的 2 500 kW 变为优化后的 450 kW。同理通过算例仿真分析得出,在园区综合能源系统中接入多类储能单元能够减少电制热输出波动频次,减少电制热输出功率,降低因能源转换过程中功率损耗。

3.4 考虑多类储能需求响应对园区 IES 优化调度成效分析

通过前面场景设计及算例仿真结果分析得出,针对多储能响应对兼顾源荷不确定性的园区综合能源系统调度成效主要有 2 个方面。

1) 降本增效。综合考虑园区各项成本支出,包括购电、购气、可再生风电弃风、环境污染成本等多目标经济指标,在考虑多类储能响应参与园区 IES 运行调度,缓解用能高峰时段且购能价格高昂无法满足负荷需求情况发生。由于储能单元具有存储功效,将消纳大量可再生风电,从而减少可再生风电弃风成本。

2) 削峰填谷。根据算例仿真结果图 3、8 得出,在电气热负荷需求高峰时段,作为园区系统等效电源,多类储能单元释放能量,填补能量需求缺口;在电气热负荷需求较低,多类储能单元可以作为园区系统等效负荷,消纳可再生风电资源。起到削峰填谷作用。

4 结语

该文构建源荷不确定和多类储能响应的园区 IES 多目标优化模型,结合实际算例仿真,考虑园区系统内不确定风电出力和不确定负荷响应,多类储能响应与未含储能出力的园区 IES 多目标优化模型进行对比,结论如下。

1) 构建兼顾源荷不确定性的园区可再生风电出力模型和电气热负荷响应模型,在每种模型中引入弹性不确定因子表征需求响应结果。

2) 综合考虑园区内经济、可靠稳定、节能环保等多因素构建含多类储能响应的多目标优化模型,重点研究多类储能响应下对园区内各能源出力、能源转换效率、负荷需求响应的优化结果。并通过算例仿真结果验证了模型的有效性,为园区 IES 源荷

储需求互济服务提供了新的有效策略。

3) 基于改进的粒子群优化算法(PSO)得到未含储能与含多类储能响应参与园区 IES 的经济、节能、环保的调度运行结果;并显示具有良好的优化精度和收敛效率。

参考文献:

- [1] 张永会,鹿丽,潘超,等. 计及风—光—荷时序特性的主动配电网源—储规划策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(20):48-56.
ZHANG Yonghui, LU Li, PAN Chao, et al. Planning strategies of source-storage considering wind-photovoltaic-load time characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 48-56.
- [2] 吴俊,诸军,沈海平,等. 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J]. 高压电器,2019,55(12):211-214.
WU Jun, ZHU Jun, SHEN Haiping, et al. Analysis of the three-phase voltage unbalance computing formula used for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 211-214.
- [3] 马喜平,沈渭程,杨臣,等. 高比例新能源微电网参与电网调峰能力评估[J]. 电网与清洁能源,2019,35(8):62-68+75.
MA Xiping, SHEN Weicheng, YANG Chen, et al. Evaluation of high proportion new energy microgrids participating in peak-shaving capacity of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(8): 62-68+75.
- [4] 钱振宇,王泉,魏建民,等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020,48(6):35-39+60.
QIAN Zhenyu, WANG Quan, WEI Jianmin, et al. Flexible optimization model for newenergy access capacity considering the method of electricity reduction and maximum acceptance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 35-39+60.
- [5] 张长久,贾清泉,赵铁军,等. 考虑需求响应的增量配电网分布式电源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020,32(8):7-16.
ZHANG Changjiu, JIA Qingquan, ZHAO Tiejun, et al. Optimal configuration of distributed generations in incremental distribution network considering demand-side response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(8):7-16.
- [6] 姚建国,杨胜春,王珂,等. 平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):85-92.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9):85-92.
- [7] 翟晶晶,吴晓蓓,傅质馨,等. 考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J]. 中国电力,2020,53(8):9-18.
ZHAI Jingjing, WU Xiaobei, FU Zhixin, et al. Robust optimization of integrated energy systems considering demand response and photovoltaic uncertainty[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 9-18.
- [8] 张涛,章佳莹,王凌云,等. 计及负荷侧响应的智能小区微网经济调度[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(3):78-85.
ZHANG Tao, ZHANG Jiaying, WANG Lingyun, et al. Optimal economic dispatch for intelligent community micro-grid considering load side demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):78-85.
- [9] 胡泉,闻旻,刘育权,等. 基于用户侧能源转换设备的综合能源系统可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(2):11-19.
HU Xiao, WEN Min, LIU Yuquan, et al. Reliability assessment of integrated energy system based on user side conversion components[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2):11-19.
- [10] 李彬,曹望璋,马永红,等. 计及倒换时延的需求响应业务 P 圈保护策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):2895-2904.
LI Bin, CAO Wangzhang, MA Yonghong, et al. A P-cycle protection strategy of demand response service considering the protection switching latency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10):2895-2904.
- [11] 彭文昊,陆俊,冯勇军,等. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法[J]. 电网技术,2018,42(5):1588-1594.
PENG Wenhao, LU Jun, FENG Yongjun, et al. A demand response strategy optimization considering user participation uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1588-1594.
- [12] 米阳,李战强,吴彦伟,等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术,2018,42(6):1899-1906.

- MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, et al. Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42 (6): 1899-1906.
- [13] 孙宇军, 王岩, 王蓓蓓, 等. 考虑需求响应不确定性的多时间尺度源荷互动决策方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 106-113+159.
- SUN Yujun, WANG Yan, WANG Beibei, et al. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (2): 106-113+159.
- [14] 陈永进. 考虑园区能源互联网接入及其需求响应的配电网规划方法[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 45-52.
- CHEN Yongjin. Distribution network planning method co-nsidering park energy internet access and its demand des-ponse[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32 (10): 45-52.
- [15] 孙丛丛, 王致杰, 江秀臣, 等. 计及需求响应的并网型微电网协同优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 30-37.
- SUN Congcong, WANG Zhijie, JIANG Xiuchen et al. Collaborative optimization strategy for grid-connected microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30 (1): 30-37.
- [16] 张禹森, 孔祥玉, 孙博伟, 等. 基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J]. 电网技术, 2018, 42 (6): 1811-1819.
- ZHANG Yusen, KONG Xiangyu, SUN Bowei, et al. Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42 (6): 1811-1819.
- [17] 郑洁云, 胡梦月, 胡志坚, 等. 考虑可靠性及需求响应的配电网规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34 (3): 173-182.
- ZHENG Jieyun, HU Mengyue, HU Zhijian, et al. Multi-objective planning model of distribution network considere-ring reliability and demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34 (3): 173-182.
- [18] 郑亚锋, 魏振华, 高宇峰, 等. 多能流系统经济-节能多目标最优运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32 (9): 77-85.
- ZHENG Yafeng, WEI Zhenhua, GAO Yufeng, et al. Multi-objective optimal operation of multi-energy carrier system considering economy and energy conservation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(9): 77-85.
- [19] 涂京, 周明, 李庚银, 等. 面向居民需求响应的售电公司势博弈分布式优化策略[J]. 中国电机过程学报, 2020, 40(2): 400-411.
- TU Jing, ZHOU Ming, LI Gengyin, et al. A potential game based distributed optimization strategy for the electricity retailer considering residential demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (2): 400-411.
- [20] 牛启帆, 武鹏, 张菁, 等. 考虑多设备最优能流路径的电一气互联系统运行优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 109-116.
- NIU Qifan, WU Peng, ZHANG Jing, et al. Operation optimization of Electricity-Natural gas interconnected system considering the optimal energy flow path of multiple devices[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 109-116.
- [21] 武庚, 隆竹寒, 曾博, 等. 计及用户行为的需求响应对分布式发电系统充裕度的影响[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 119-126.
- WU Geng, LONG Zhuhan, ZENG Bo, et al. Influence of demand response on supply adequacy of distributed generation system considering behaviors of users [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (8): 119-126.
- [22] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
- ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatching of an active distribution network considering dynamic regulation of controllable load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (4): 104-110.
- [23] 谈竹奎, 丁超, 赵立进, 等. 用电负荷指纹管理的层次化系统设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 89-95.
- TAN Zhukui, DING Chao, ZHAO Linjin, et al. Hierarchical system design for dactylogram management of electricity use load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 89-95.