

引用格式:陈说,许仪勋,田雨,等.考虑需求响应和废弃物分类处理的微电网多目标优化配置模型[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):199-210.

Citation: CHEN Shuo, XU Yixun, TIAN Yu, et al. Multi-objective optimal configuration model of microgrid considering demand response and waste classification treatment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 199-210.

考虑需求响应和废弃物分类处理的微电网 多目标优化配置模型

陈说¹, 许仪勋¹, 田雨¹, 韩菲儿²

(1.上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2.国网浙江省绍兴市上虞区供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要:为解决城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)处理过程中环境污染和资源浪费等问题,提出将城市固体废弃物管理和可再生发电系统与传统微电网配置方案融合。首先,面对微电网内部源荷匹配性的不足以及不同风光配置容量占比造成的微电网出力特征差异,提出依据微电网风光配置条件制定需求响应策略。然后,建立以等年值配置运行成本、能源浪费率和负荷缺电率最小为目标的多目标优化配置模型,为提高帕累托解集的收敛性和分布性,采用增广 ϵ -约束法求解。最后,采用改进的微电网IEEE-33节点模型进行仿真,算例结果表明,该微电网有效提升了清洁能源的消纳能力和系统的可靠性,同时具有良好的经济性。

关键词:微电网;城市固体废弃物;需求响应策略;多目标;容量配置

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.021 中图分类号: TM615 文章编号: 1673-9140(2024)06-0199-12

Multi-objective optimal configuration model of microgrid considering demand response and waste classification treatment

CHEN Shuo¹, XU Yixun¹, TIAN Yu¹, HAN Feier²

(1.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2.Shaoxing City Shangyu District Power Supply Company, State Grid Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to solve the problems of environmental pollution and resource waste in the process of municipal solid waste (MSW) disposal, it is proposed to integrate MSW management and renewable power generation system with the traditional microgrid configuration scheme. In the face of the lack of source-load matching within the microgrid and the differences in microgrid output characteristics caused by different wind and solar configurations, it is proposed to formulate a demand response strategy based on the wind and solar configuration conditions of the microgrid. A multi-objective optimal allocation model is established with the objectives of minimizing the operating cost, energy waste rate and load shortage rate of equal annual value allocation, and in order to improve the convergence and distribution of the Pareto solution set, the augmented generalized ϵ -constraint method is used to solve the problem. Finally, the improved IEEE-33 node model of the microgrid is used for simulation, and the results of the arithmetic example show that the microgrid effectively enhances the clean energy consumption capacity and system reliability, and at the same time has good economics.

Key words: microgrid; municipal solid waste; demand response strategy; multi-objective; capacity allocation

面对不断增长的能源需求和有限的化石燃料资源,可再生能源的开发和利用必须得到高度重

视^[1-5]。在此背景下,城市固体废弃物和农业废弃物等生物质能源因其具有巨大的发电潜力引起了广

收稿日期:2023-12-11;修回日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金(61672337);国家电网公司科技项目(8508000202205096)

通信作者:许仪勋(1969—),男,博士,讲师,主要从事电力系统运行与控制、智能用电方面的研究;E-mail: Xu_yixun@sina.com

泛关注^[6]。此外,传统的废弃物处理方式存在环境问题,而随着人口数量不断增加,建立健全的废弃物管理系统也成为许多发展中国家面临的重大课题。

通过整合太阳能、风能以及城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW)等生物质能源,微电网能够实现更高程度的自给自足,并提升环境友好性^[7-8]。文献[9]采用了生命周期评估方法,得出了将固体废弃物焚烧作为一种对环境更友好的选择的结论。此外,文献[10]对印度各种生活垃圾处理技术进行了比较分析,认为厌氧消化和热解气化是在经济和环境方面效益最佳的技术。而文献[11]则验证了在北京和天津地区利用垃圾填埋气体发电的技术在经济上是可行的。这些研究只单独关注了垃圾焚烧的能源利用,而忽略了处理过程中的垃圾分类和可再生能源的配合。

通过发电侧和需求侧之间的双向交互,需求响应(demand response, DR)能够有效地缓解发电和用电的不确定性,从而提高电网的稳定性和经济效益^[12-14]。文献[15]建立了用户参与需求响应的调度优先级函数,用于划分不同用户的调度响应能力级别。文献[16]提出了一种动态激励型需求响应参与的实时滚动优化策略,旨在利用价格提高用户的参与程度。此外,文献[17]基于用电习惯,分别建立了居民、商业、工业区域的需求响应模型。为降低供需差异,文献[18]构建了基于风光出力的动态响应电价机制,以使用户的用电习惯更加与风光发电的总出力特性相匹配。上述文献在选择需求侧需求响应目标函数时过于简化,没有考虑到发电侧风光配置容量占比的差异对出力曲线产生的影响,从而影响功率的平衡。

本文在前述的研究基础上,提出了一种结合废弃物管理和可再生发电系统的微电网配置模型,建立一个以等年值配置运行成本、能源浪费率和负荷缺电率达到最小为目标的微电网多目标优化配置模型。并提出了一个需求响应模型,考虑不同的响应策略对负荷曲线的影响。使用增广 ϵ -约束法对模型进行求解,通过算例证明了该微电网具有良好的经济性、灵活性调节能力和生态经济效益,同时分析了微电网在不同风光容量配置占比下的最优需求响应策略。

1 微电网模型

含城市固体废弃物管理和可再生发电系统的

微电网结构配置及能量流向如图1所示。网内能源供应以光伏、风机为主,引入可处理固体废弃物的能源化利用设备,以蓄电池作为灵活性调节资源。微电网电压为0.38 kV,以孤岛运行方式运行。

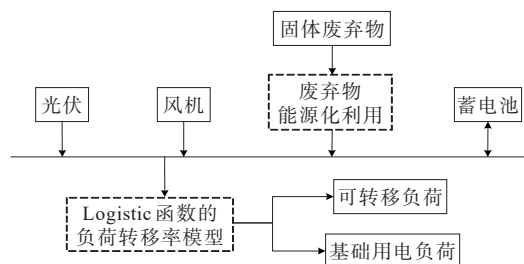


图1 微电网结构

Figure 1 Microgrid structure diagram

1.1 MSW管理和可再生发电系统的功率模型

鉴于垃圾分类工作的逐步推进,城市固体废弃物现在主要被分为干垃圾和湿垃圾2个类别,而针对这两类垃圾的能源转化和处理方式各有不同,处理所消耗和产生的能源种类和特性也存在差异。因此,本文提出了一种综合考虑多种垃圾处理方式的MSW管理和可再生发电系统,如图2所示。

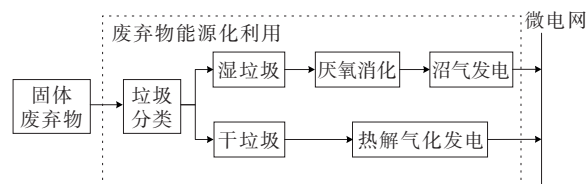


图2 MSW管理和可再生发电系统

Figure 2 MSW management and renewable generation systems

图2中的MSW管理和可再生发电系统可以主要分为3个部分:厌氧消化单元、沼气发电单元以及热解气化发电单元。各组成单元的工作原理及其能源输入和输出特性如下所述。

1.1.1 厌氧消化单元

厌氧消化单元是通过水解、酸化、产氢产乙酸、甲烷化等阶段,将蕴藏在湿垃圾中的能量转化为沼气^[19],实现资源回收,沼气主要由甲烷(60%~70%)、二氧化碳(30%~40%)和少量的其他气体组成。

沼气产量的计算方法为

$$Q(t) = B_{bg}(t) \cdot B_{pp} \quad (1)$$

式中, B_{bg} 为输入的湿垃圾的质量; B_{pp} 为湿垃圾生产沼气的潜力。

1.1.2 沼气发电单元

沼气低位热值的计算方法为

$$L_{CV} = \omega_{CH_4} \cdot L_{CV}^{CH_4} \quad (2)$$

式中, ω_{CH_4} 为沼气中甲烷含量的百分比; $L_{CV}^{CH_4}$ 为甲烷的低位热值。

燃气轮机输出功率的计算方法为

$$P_{bio}(t) = \eta_{bio} \cdot Q(t) \cdot L_{CV} \quad (3)$$

式中, η_{bio} 为燃气轮机的电转换效率。

沼气发电单元的最大装机容量可根据一年内单日可利用湿垃圾的最大值来确定,计算方法为

$$P_{bio}^{max} = \frac{(B_{bg} \cdot B_{pp})(\omega_{CH_4} \cdot L_{CV}^{CH_4}) \cdot \eta_{bio}}{24 \cdot \eta_{CUF}} \quad (4)$$

式中, η_{CUF} 为容量利用系数。

1.1.3 热解气化发电单元

热解气化发电单元是通过气化炉中的高温(800~900℃),将干垃圾部分氧化,转化为可燃气体混合物,该气体被称为合成气^[20],主要成分为氢气(30%~40%)、一氧化碳(20%~30%)、二氧化碳(15%~20%)、甲烷(10%~15%)、水(6%)、乙烯(1%)、氮的混合物(1%),燃气轮机可以利用合成气来进行发电。

气化炉每小时的输出功率为

$$P_{gasi}(t) = \frac{B_{bmg}(t) \cdot C_V^{bmg} \cdot \eta_{bmg} \times 1000}{3.6} \quad (5)$$

式中, B_{bmg} 为输入的干垃圾的质量; C_V^{bmg} 为干垃圾的热值; η_{bmg} 为气化炉的电转换效率。

气化炉的最大装机容量可根据一年内单日可利用干垃圾的最大值来确定,计算方法为

$$P_{gasi}^{max} = \frac{B_{bmg} \cdot C_V^{bmg} \cdot \eta_{bmg} \times 1000}{3.6 \times 24 \times \eta_{CUF}} \quad (6)$$

1.2 风机组件的功率模型

1.2.1 风机轮毂所在高度风速修正

风速会随着高度的不断变化而发生相应的改变,因此需要地面气象站对所采集的风速数据进行一定的修正^[21]。修正后的风速为

$$V(t) = V_{ref}(t) \cdot \left(\frac{h_c}{h_{ref}} \right)^p \quad (7)$$

式中, V_{ref} 为地面气象站所采集的风速; h_c 、 h_{ref} 分别为风机轮毂中心处和地面气象站的高度; p 为地表粗糙因子。

1.2.2 风机出力计算

风力发电机的输出功率与风速之间的关系可近似表示为如下分段函数:

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0, & V(t) \leq V_{in} \\ P_{wt,N} \cdot \frac{V^2(t) - V_{in}^2}{V_r^2 - V_{in}^2}, & V_{in} < V(t) \leq V_r \\ P_{wt,N}, & V_r < V(t) \leq V_{out} \\ 0, & V(t) > V_{out} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{wt,N}$ 为风机的额定功率; V_{in} 、 V_r 、 V_{out} 分别为风机的切入、额定、切出风速。

1.3 光伏组件的功率模型

光伏组件的输出功率主要受额定功率、光照强度、环境温度等因素的影响:

$$P_{pv}(t) = \frac{P_{pv,N} \cdot G_c(t)}{G_{stc}} \cdot \left\{ 1 + k [T_c(t) - T_{stc}] \right\} \quad (9)$$

式中, $P_{pv,N}$ 为光伏的额定功率; G_c 、 G_{stc} 分别为地面气象站所采集和标准条件下的太阳辐照度; T_c 、 T_{stc} 分别为地面气象站所采集和标准条件下的温度; k 为功率温度系数。

1.4 蓄电池

蓄电池在充放电的过程中存在一定的损耗,在存储的过程中存在随时间消散等特性,其电量计算方法为

$$E_{es}(t) = (1 - \tau) E_{es}(t-1) + \left[P_{ch}(t) \eta_{ch} - \frac{P_{dis}(t)}{\eta_{dis}} \right] \quad (10)$$

式中, τ 为蓄电池的自放电系数; $E_{es}(t-1)$ 为上一时段蓄电池的剩余能量; P_{ch} 、 P_{dis} 分别为蓄电池的充电和放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为蓄电池充电和放电的转换效率。

蓄电池的荷电状态的计算方法为

$$S_{OC}(t) = \frac{E_{es}(t)}{E_{es}^{max}} \quad (11)$$

式中, E_{es}^{max} 为蓄电池的最大电量。

2 需求侧响应模型

2.1 基于 Logistic 函数的负荷转移率模型

本文提出一种基于 Logistic 函数的需求侧响应模型。以峰谷负荷转移为例,在峰谷电价差的激励下,用户根据自愿参与响应的原则,其行为表现出一定的随机性。因此,真实的需求侧响应负荷量会处于乐观响应曲线和悲观响应曲线之间,这样能更准确地描述用户参与需求侧响应的情^[22],如图3所示。

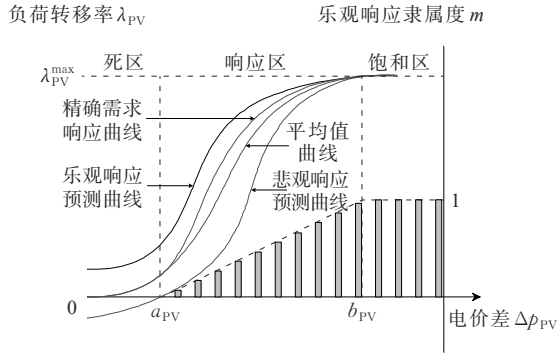


图3 用户预测响应模型

Figure 3 User predictive response model

图3中, Δp_{pv} 为电价差, λ_{pv} 为负荷转移率, 即转移用电量与原先平均用电量之比。该曲线分为“死区”、“响应区”和“饱和区”, 在“死区”, 由于电价差过小, 未能激发起用户参与响应的积极性; 在“响应区”, 随着电价差的增大, 用户参与响应积极性被充分调动; 在“饱和区”, 电价差进一步增大, 但用户参与响应的潜力已被完全挖掘, 因此转移率达到最大值。

为提高需求响应模型的精度, 本文通过用户响应随机性和乐观响应隶属度这2个指标对预测用户负荷转移率响应机理模型进行概率约束^[23]。具体计算公式为

$$\lambda_{pv}(\Delta p_{pv}) = \frac{a}{1 + e^{-\frac{\Delta p_{pv} - c}{m}}} + b \quad (12)$$

$$\tilde{\lambda}_{pv} = \begin{cases} \frac{\lambda_{pv}^{\max} + \lambda_{pv}^{\min}}{2}, & \Delta p_{pv} \leq a_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\min} + \frac{\lambda_{pv}^{\max} - \lambda_{pv}^{\min}}{2} (1 + m), & a_{pv} < \Delta p_{pv} \leq b_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\max}, & \Delta p_{pv} > b_{pv} \end{cases} \quad (13)$$

$$m = \frac{\Delta p_{pv} - a_{pv}}{b_{pv} - a_{pv}} \quad (14)$$

式(12)~(14)中, a 、 b 、 c 、 μ 均为 Logistic 函数中的已知量; λ_{pv}^{\max} 、 λ_{pv}^{\min} 分别为乐观、悲观响应预测的负荷转移率; a_{pv} 、 b_{pv} 均为电价差划分区域分界点; m 为积极响应隶属度, 用来表示用户符合积极响应估计的概率。

同理可得峰转平、平转谷的预测负荷转移率 $\tilde{\lambda}_{pf}$ 、 $\tilde{\lambda}_{fv}$, 则预测需求响应后的负荷转移量以及转移后的负荷值分别为

$$\begin{bmatrix} D_p \\ D_f \\ D_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\lambda}_{pf} & -\tilde{\lambda}_{fv} \\ \tilde{\lambda}_{pf} & 0 & -\tilde{\lambda}_{fv} \\ \tilde{\lambda}_{pv} & \tilde{\lambda}_{fv} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{p0} \\ P_{f0} \\ P_{v0} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} P_p \\ P_f \\ P_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{p0} \\ P_{f0} \\ P_{v0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_p \\ D_f \\ D_v \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(15)~(16)中, P_{p0} 、 P_{f0} 、 P_{v0} 分别为实施峰谷分时电价前各时段的负荷值。

2.2 需求响应策略

不同的需求响应策略通常会使响应后的负荷曲线呈现出不同的负荷特征指标。为了降低微电网的配置成本, 本文提出多种需求响应策略, 旨在寻找出在不同风光容量占比配置情况下的微电网最优响应策略。综合考虑需求响应成本、用户用电成本、可靠性等因素, 为决策者提供一个全面的指导框架, 以便在不同微电网配置环境下选择最适合的需求响应策略。

1) 策略1: 最小化用户用电成本。

在该策略下, 可以使用户用电需求更加具有弹性, 进一步激励用户积极参与与能源市场, 通过灵活的用电需求管理, 用户能够更好地适应市场变化和能源供需波动, 实现更经济高效的能源使用。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T c_{\text{tou}}(t) P_{\text{load}}(t) \quad (17)$$

式中, c_{tou} 为分时电价。

2) 策略2: 最小化电负荷波动。

通过减少电负荷的剧烈波动, 微电网系统能够更好地应对电力需求的变化, 减少能源储备的消耗和蓄电池的使用频率, 从而延长其使用寿命并降低运行成本。

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [P_{\text{load}}(t) - P_{\text{avg}}]^2} \quad (18)$$

式中, P_{avg} 为负荷的平均值。

3) 策略3: 最贴近光伏出力曲线。

通过将响应策略与光伏发电的出力曲线相匹配, 微电网系统能够更加有效地捕捉和利用光伏所产生的电力, 能够在光伏发电产能高峰期增加电力消耗, 减少系统中的能源浪费和过剩, 同时在光伏出力不足的情况下, 通过其他能源来源进行补充, 确保持续稳定的电力供应。

$$f_3 = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [P_{\text{load}}(t) - P_{pv}(t)]^2} \quad (19)$$

4) 策略4: 综合考虑电负荷波动及用户用电成本。

$$f_4 = \xi_1 \frac{f_2}{\min f_2} + \xi_2 \frac{f_1}{\min f_1} \quad (20)$$

5) 策略5: 综合考虑贴近光伏出力曲线及用户

用电成本。

$$f_5 = \xi_1 \frac{f_3}{\min f_3} + \xi_2 \frac{f_1}{\min f_1} \quad (21)$$

2.3 需求响应约束条件

1) 保持用户用电量变化在一定范围。

$$(1 - \eta_{flu}) \sum_{t=1}^T P_{load0}(t) \leq \sum_{t=1}^T P_{load}(t) \leq (1 + \eta_{flu}) \sum_{t=1}^T P_{load0}(t) \quad (22)$$

式中, η_{flu} 为电量波动比例。

2) 峰、平、谷电价大小关系约束。

$$\begin{cases} 2 \leq c_p/c_v \leq 5 \\ c_v \leq c_f \\ c_f \leq c_p \end{cases} \quad (23)$$

式中, c_p, c_f, c_v 分别为峰、平、谷时段电价。

3) 多目标优化约束。

$$\xi_1 + \xi_2 = 1 \quad (24)$$

3 考虑多目标的微电网优化配置模型

3.1 配置运行成本最小

本文微电网优化配置以微电网运行周期内等年值配置运行成本 C_{eco} 最小为优化目标 1, 包括初始投资费用 C_{in} 、运行维护费用 C_{om} 、置换费用 C_{rep} 、污染物排放费用 C_{pol} 等^[24]。

$$\min F_1 = C_{eco} = C_{in} + C_{om} + C_{rep} + C_{pol} \quad (25)$$

其中微电网的等年值初始投资成本^[25]为

$$C_{in} = \sum_{i=1}^M (N_i c_{in,i}) \frac{r(1+r)^{n-y}}{(1+r)^n - 1} \quad (26)$$

式中, M 为组件类型的数目; N_i 为第 i 种组件的数目; $c_{in,i}$ 为第 i 种组件的初始投资费用; r 为贴现率; n 为微电网的全生命周期年限; y 为微电网运行的年数。

微电网的年均运行维护成本为

$$C_{om} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M N_i c_{om,i} P_i(t) \quad (27)$$

式中, $c_{om,i}$ 为第 i 种组件的运行维护系数; P_i 为第 i 种组件的输出功率。

微电网的等年值置换成本为

$$C_{rep} = \sum_{i=1}^M (N_i c_{rep,i}) \frac{r(1+r)^{n-y}}{(1+r)^n - 1} \quad (28)$$

式中, $c_{rep,i}$ 为第 i 种组件的置换费用。

微电网的污染物排放费用为

$$C_{pol} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^R N_i c_{emi,j} c_{gov,j} P_i(t) \quad (29)$$

式中, R 为排放污染物的种类数; $c_{emi,j}, c_{gov,j}$ 分别为第

j 种污染物的排放和治理费用系数。

3.2 能源浪费率、负荷缺电率最小

为促进风电、光伏的就地消纳率, 以及提高系统的稳定性和可靠性, 本文将以能源浪费率和负荷缺电率最小作为优化目标 2 和 3。

$$\min F_2 = \frac{\sum_{t=1}^T P_{was}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)} - \delta_{ewr} \quad (30)$$

$$\min F_3 = \frac{\sum_{t=1}^T P_{bre}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)} - \delta_{lpsp} \quad (31)$$

式中, P_{was}, P_{bre} 分别为微电网的能源浪费和切负荷功率; $\delta_{ewr}, \delta_{lpsp}$ 分别为微电网允许的能源浪费率和负荷缺电率。

3.3 约束条件

1) 功率平衡约束。

$$P_{wt}(t) + P_{pv}(t) + P_{bio}(t) + P_{gasi}(t) + P_{ch}(t) - P_{dis}(t) + P_{bre}(t) = P_{load}(t) + P_{was}(t) \quad (32)$$

2) 潮流约束。

$$\begin{cases} P_i^{IEEE}(t) = U_i(t) \sum_{j=1}^L U_j(t) (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i^{IEEE}(t) = U_i(t) \sum_{j=1}^L U_j(t) (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (33)$$

式中, P_i^{IEEE}, Q_i^{IEEE} 分别为节点 i 注入的有功和无功功率; U_i, U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压值; L 为系统的节点总数; $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$ 分别为节点 i 和节点 j 间的电导、电纳和功率角。

3) 分布式电源功率约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{wt}^{\max} \\ 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv}^{\max} \\ P_{bio}^{\min} \leq P_{bio}(t) \leq P_{bio}^{\max} \\ P_{gasi}^{\min} \leq P_{gasi}(t) \leq P_{gasi}^{\max} \end{cases} \quad (34)$$

式中, $P_{wt}^{\max}, P_{pv}^{\max}$ 分别为风机、光伏的最大输出功率; $P_{bio}^{\min}, P_{gasi}^{\min}$ 分别为沼气发电单元和热解气化发电单元的最小输出功率。

4) 蓄电池约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch}(t) \leq P_{ch}^{\max} \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{\max} \\ S_{OC}^{\min} \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC}^{\max} \\ S_{OC,ini} = S_{OC}(T) \end{cases} \quad (35)$$

式中, $P_{ch}^{\max}, P_{dis}^{\max}$ 分别为蓄电池的最大充放电功率;

S_{OC}^{\min} 、 S_{OC}^{\max} 分别为蓄电池荷电状态的上、下限; $S_{OC,ini}$ 为初始荷电状态。

5) 设备安装数量约束。

$$\begin{cases} 0 \leq N_{wt} \leq N_{wt}^{\max} \\ 0 \leq N_{pv} \leq N_{pv}^{\max} \\ 0 \leq N_{es} \leq N_{es}^{\max} \end{cases} \quad (36)$$

式中, N_{wt}^{\max} 、 N_{pv}^{\max} 、 N_{es}^{\max} 分别为风机、光伏、蓄电池的装机数量上限。

3.4 优化运行策略

本文考虑微电网的孤岛优化运行, 采用可再生

能源优先出力的策略, 优先利用风机、光伏发电。定义净负荷为负荷与风光出力的差值, 当净负荷小于0, 即风光出力大于负荷所需功率时, 多余的电能供给蓄电池储能, 若蓄电池仍无法消耗多余功率时需考虑部分弃电; 当净负荷大于0, 即风光出力小于负荷所需功率时, 根据上一时刻MSW管理和可再生发电系统的运行状态, 选择使用MSW管理和可再生发电系统或蓄电池补充功率缺额, 若二者出力仍无法满足负荷功率时需考虑部分切除负荷。系统运行的具体策略如图4所示。

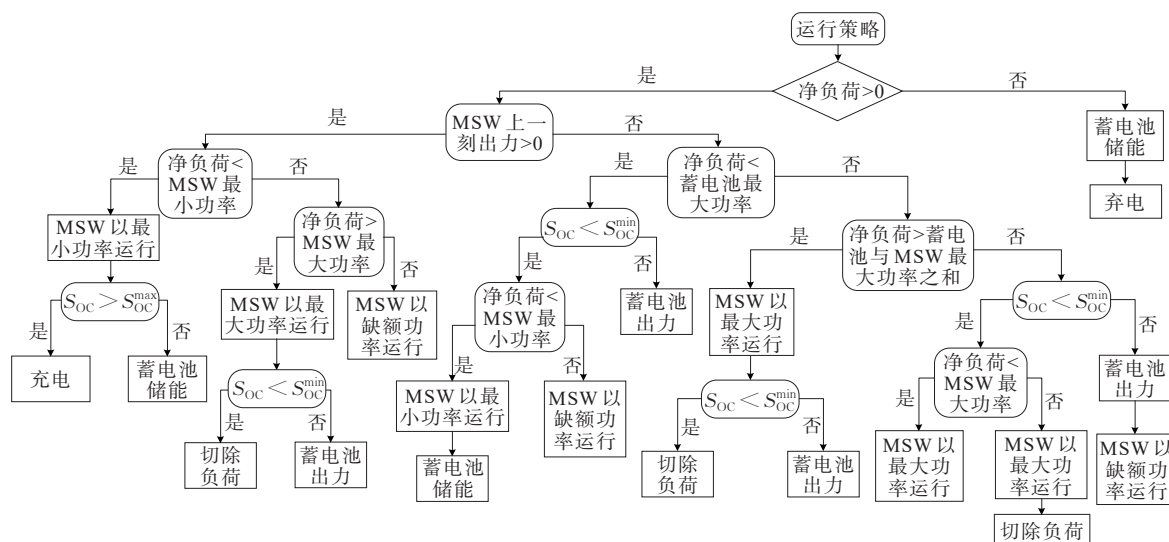


图4 微电网运行策略

Figure 4 Microgrid operation strategy

3.5 多目标优化算法

本文所提的微电网优化配置模型是一个多目标优化问题, 常用的多目标优化算法有线性加权法、主要目标法和逼近目标法等。

增广 ϵ -约束法是一种主要目标法, 相比线性加权法只能将多个目标函数合成一个标量函数, 可以更好地反映问题的本质和复杂性。相比于逼近目标法只能用欧氏距离, 增广 ϵ -约束法可以度量目标函数之间的距离, 更好地反映目标函数之间的相互影响, 从而可以更好地逼近帕累托最优解。

增广 ϵ -约束法的思想是以次要目标作为约束条件对一个主目标进行优化求解, 步骤如下:

1) 分别单独考虑 F_1, F_2, \dots, F_m , 求解其目标函数的最优值 $Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{mm}$, 并将最优值的决策变量代入其余目标函数, 得到支付矩阵:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} \quad (37)$$

2) 可从矩阵中对第 i 个目标函数 F_i 得到最优解和最劣解:

$$\begin{cases} F_i^U = \min \{ Z_{ij} \} \\ F_i^{SN} = \max \{ Z_{ij} \} \end{cases} \quad (38)$$

3) 依据决策者的喜好选择一个目标为主目标, 其余目标即为次要目标, 将次要目标转化为约束条件, 目标函数变为

$$\begin{cases} \min F_1(x) - \rho \cdot \left(\frac{s_2}{v_2} + \frac{s_3}{v_3} + \dots + \frac{s_m}{v_m} \right) \\ \text{s.t.} \begin{cases} F_2(x) + s_2 = \epsilon_2 \\ F_3(x) + s_3 = \epsilon_3 \\ \dots \\ F_m(x) + s_m = \epsilon_m \end{cases} \end{cases} \quad (39)$$

式中, s_i 为非负的松弛变量; $v_i = F_i^{SN} - F_i^U$ 为目标函数的取值范围。

$$\epsilon_i = F_i^U + \frac{\omega \cdot v_i}{g} \quad (40)$$

式中, g 为第 i 个目标函数所需的网格点数。

4) 对于得到关于 F_1 的单目标优化子问题,在 MATLAB 中调用 gurobi 求解器求取出最优解,并根据最优解来计算 F_2, F_3, \dots, F_m ,直至所有子区间都作为约束完成优化求解。

5) 每次得到的解若在可行域内则加入帕累托解集,若不在可行域内则丢弃,最后从解集中筛选非支配解,得到帕累托前沿。

综上,本文建立的多目标优化模型的计算步骤如图 5 所示。

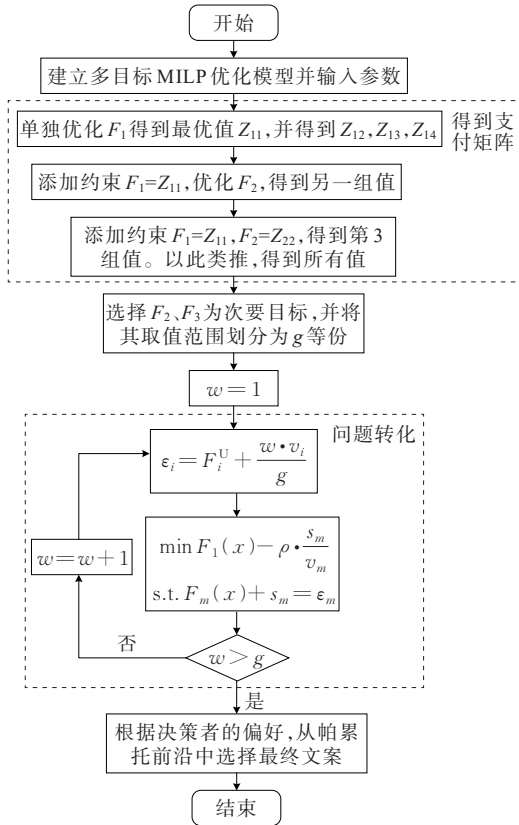


图 5 基于增广 ϵ -约束法的多目标优化模型求解

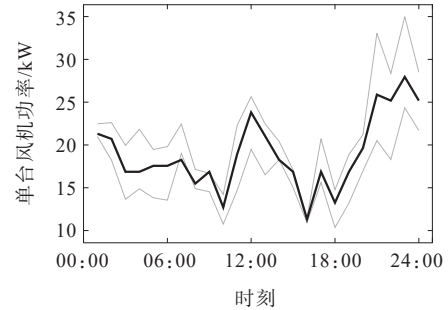
Figure 5 Multi-objective optimization model solution based on augmented ϵ -constraint method

4 算例分析

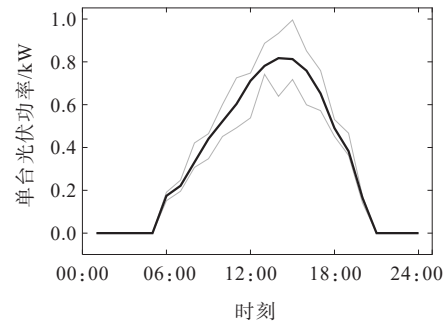
4.1 计算数据说明

本文采用改进的微电网 IEEE-33 节点系统进行算例分析,将光伏、风机、沼气发电单元、热解气化发电单元以及储能装置分别接于系统的节点 6、11、16、21 和 28,机组中均包含相应的耦合装置。本文采集了包括该地全年的风速、光照强度、温度、城市固体废弃物排放量、负荷等数据作为输入,其中全年平均风速为 4.86 m/s,日平均辐照约为 5.85 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,日平均温度为 25.95 $^\circ\text{C}$,日均生产固体废弃物 22.5 t,日平均负荷 100.9 kW,图 6 为各微源出

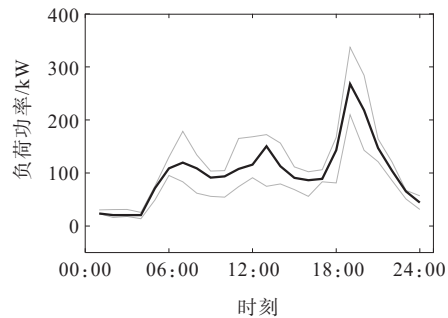
力及负荷的具体波动,图 7 为不同季节的废弃物产生量。其他参数如下:湿垃圾生产沼气的潜力为 55 m^3/t ,甲烷的低位热值为 36.3 MJ/m^3 或 10.08 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,干垃圾的热值为 4.27 MJ/kg ,燃气轮机和气化炉的电转换效率均为 20%,地面气象站的参



(a) 风机出力曲线



(b) 光伏出力曲线



(c) 负荷曲线

图 6 典型日风机、光伏、负荷波动曲线

Figure 6 Wind turbine, PV and load fluctuation curves

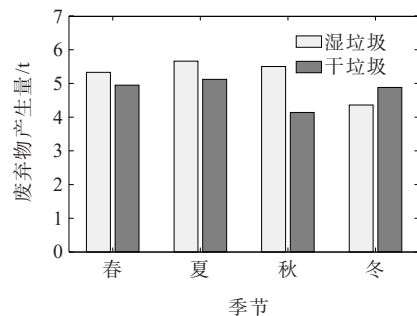


图 7 不同季节的废弃物产生量

Figure 7 Waste generation in different seasons

考高度为 9 m,地表粗糙因子取 0.14,蓄电池 S_{oc} 范围设为 $[0.2, 0.8]$,蓄电池的初始 S_{oc} 取 0.5,需求响应中,乐观响应预测曲线参数 a 、 b 、 c 、 μ 分别设为 0.1、0、0.4、0.1,悲观响应预测曲线参数分别设为 0.104、 -0.0036 、0.4、0.1,负荷转移率分界点 a_{pv} 、

b_{pv} 、 a_{pf} 、 b_{pf} 、 a_{fv} 、 b_{fv} 分别设为 0.1、0.7、0.07、0.65、0.03、0.44、 ξ_1 、 ξ_2 均设为 0.5^[26],参考国标,允许的能源浪费率和负荷缺电率分别设为 0.02 和 0.01^[25],此微电网规划年限为 20 a,根据上述优化配置模型进行微电网优化配置分析,相关成本费用如表 1 所示。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Distributed power supply parameters

分布式微源	规格	初始投资成本/ (万元·台 ⁻¹)	年均运行维护成本/ (万元·a ⁻¹)	置换成本/ (万元·台 ⁻¹)	使用寿命/ a
光伏	1 kW	0.80	0.002	0.70	20.00
风机	35 kW	3.86	0.020	3.00	20.00
蓄电池	2 V/1 000 Ah	0.16	0.002	0.09	1.36
沼气发电单元	50 kW	2.08	0.050	1.78	20.00
热解气化发电单元	50 kW	2.10	0.050	1.82	20.00

4.2 微电网配置计算结果

为研究 MSW 管理和可再生发电系统和需求响应配置结果的影响,本文设置 3 种不同规划场景对比分析:

场景 1 不使用 MSW 管理和可再生发电系统的微电网优化配置;

场景 2 使用 MSW 管理和可再生发电系统的微电网优化配置;

场景 3 使用 MSW 管理和可再生发电系统且考虑需求响应的微电网优化配置。

场景 1 至场景 3 的帕累托前沿如图 8 所示。

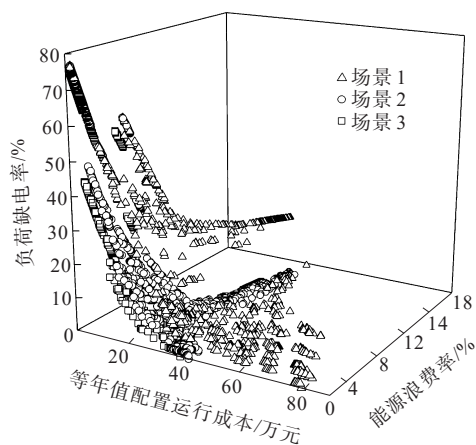


图 8 微电网不同规划场景下的帕累托前沿

Figure 8 Pareto frontiers for different planning scenarios of microgrids

从图 8 的数据可以看出,3 个目标函数之间有一定的相互制约和相互冲突关系。在同一规划场景下,帕累托前沿上的解都是非劣解,彼此之间不能相互支配,这意味着一个目标函数值的升高或降低

必然导致另外 2 个目标函数值的降低或升高。因此,不同规划场景下,帕累托前沿有明显的差异。为了比较和分析不同微电网规划场景下帕累托前沿的性能,本文使用了 2 种方法。

1) 方法 1 是找出帕累托前沿上的折中解,通过比较这些折中解来研究不同场景对目标函数的影响,表 2 为不同规划场景下帕累托前沿的折中解。

由表 2 可知,在场景 1 中,其配置成本、能源浪费率和负荷缺电率均为 3 种场景中最高。这主要是因为场景 1 中仅包含不可控微源,其出力受气候环境影响较大,难以满足负荷需求,且需配置大量储能以平抑出力波动。

相较之下,场景 2 的微电网引入了 MSW 管理和可再生发电系统,与场景 1 相比,场景 2 的能源浪费率和负荷缺电率分别降低了 0.23% 和 1.78%,降幅分别达到 4.00% 和 61.21%。这一改善主要是由于 MSW 管理和可再生发电系统属于可控微源,其加入有效降低了风机光伏配置的占比。此外,等年值配置运行成本也减少了 9.71 万元,降幅约为 24.11%,原因是降低了对蓄电池的配置容量需求。

此外,场景 2 的微电网每年处理约 8 220 t 城市固体废弃物,若按传统填埋方式处理,成本为 11.20 元·t⁻¹。通过采用厌氧消化和热解气化技术,避免了废弃物的填埋,从而在微电网的整个生命周期中节省了 184.12 万元的成本。从系统运行成本上考虑,沼气发电单元和热解气化发电单元中的燃气轮机每天约输出 393.95 kW·h 电能,若使用天然气供能,其成本为 3.91 元·m⁻³,则每年需额外支出燃料费用 100.43 万元。

表 2 不同规划场景下的帕累托折中解

Table 2 Pareto compromise solutions for different planning scenarios

场景	风机/ 台	光伏/ 块	沼气发电 单元/套	热解气化发 电单元/套	蓄电池/ 块	等年值配置运 行成本/万元	能源浪费率/ %	负荷缺电率/ %
1	2	164	0	0	123	40.2535	5.74	2.91
2	1	197	1	1	39	30.5478	5.51	1.13
3	2	105	1	1	46	26.6392	2.66	1.00

场景 3 的微电网引入了需求响应,响应策略为最小化用户用电成本,负荷侧的分时电价和优化前后的负荷曲线如图 9 所示。

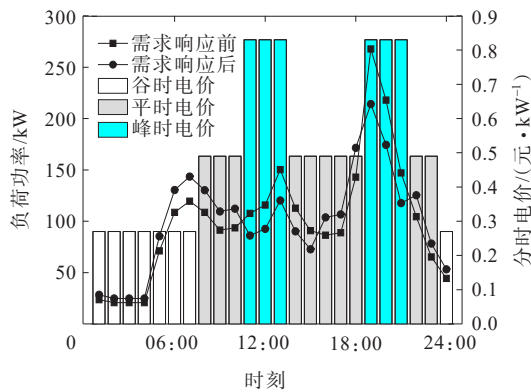


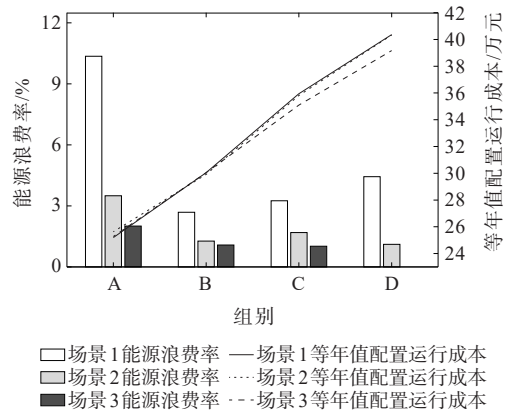
图 9 负荷曲线优化效果

Figure 9 Effect of load curve optimization

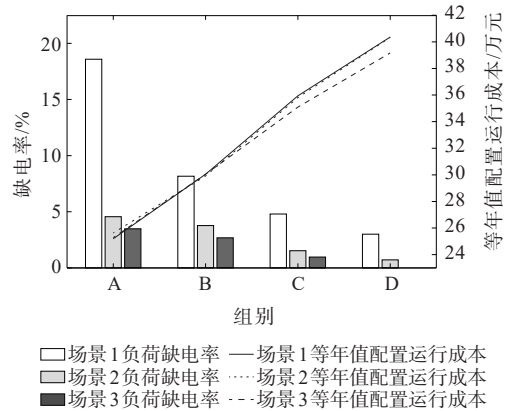
与场景 2 相比,场景 3 在能源浪费率和负荷缺电率上分别降低了 2.85% 和 0.13%,降幅分别达到 51.72% 和 11.50%。这主要得益于需求响应策略中分时电价的有效激励,不仅有助于优化负荷分布,还显著提升了系统的整体可靠性。

此外,场景 3 的等年值配置运行成本也有所下降,减少了 3.91 万元,降幅为 12.80%。这一经济效益的提升主要源于需求响应策略通过降低中午和晚上时段的负荷峰值,有效地避免了用电高峰时段的压力。使负荷曲线的平滑化,最高负荷从 267.66 kW 降至 214.13 kW,最低负荷从 20.65 kW 升至 24.78 kW,进一步减少了对分布式电源的配置需求,从而降低了投资成本。

2) 方法 2 是在不同场景中选择帕累托前沿上一个目标函数值相等或接近的解,然后比较另外两个目标函数值的优劣程度。根据等年值配置运行成本相等或接近的标准,从不同场景的帕累托前沿上选择规划方案,分为 A、B、C、D 这 4 组典型,然后对各组方案在能源浪费率和负荷缺电率方面的性能进行详细对比,如图 10 所示。



(a) 能源浪费率比较



(b) 负荷缺电率比较

图 10 不同规划场景下所选方案比较

Figure 10 Comparison of options selected for different planning scenarios

由图 10 的数据可知,不同场景下的规划方案有着各自的特点,从 A 组到 D 组,能源浪费率和负荷缺电率的变化趋势并不一致。在场景 1 中,由于仅包含不可控微源,4 组方案的能源浪费率和负荷缺电率均较高,表明其性能较差。场景 2 和场景 3 的方案在能源浪费率和负荷缺电率上表现更佳,具体来说,场景 2 和场景 3 的方案在能源浪费率上分别比场景 1 平均降低了 13.17% 和 16.63%,在负荷缺电率上平均降低了 23.97% 和 27.42%。说明在相似的等年值配置运行成本下,这 2 个场景能更有效地平衡经济性与可靠性。

综合考虑方法1和2的对比结果,场景3的规划方案在经济性、能源消纳和可靠性方面明显优于场景1和场景2,展现了其明显的优势。使用MSW管理和可再生发电系统且考虑需求响应能够在保证系统经济性的同时,实现更高效的电能管理,减少浪费,并且提高供电的稳定性和可靠性,这对于推动微电网技术的发展至关重要。

4.3 需求响应策略对配置结果的影响

本算例在方案3的基础上,改变需求响应策略进行仿真分析,得到的负荷曲线如图11所示。

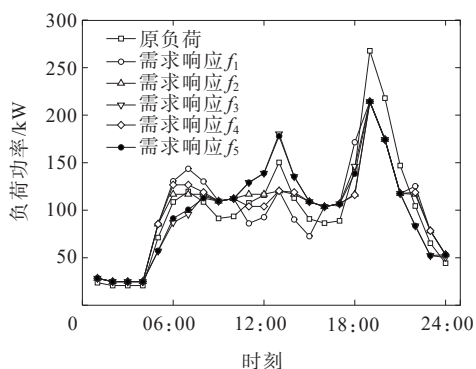


图11 各响应策略下的负荷曲线优化效果

Figure 11 Optimization effect of load curve under each response target

根据图11的数据,可以观察到原负荷在一天内共有3段用电高峰,分别在06:00—08:00、12:00—14:00以及19:00—21:00。在用电最低谷的00:00—04:00以及用电最高峰的19:00—21:00,在需求响应的激励下,负荷都相应地增加和减少。在前两段用电高峰中,需求响应 f_2 与 f_4 为了减小负荷波动,保留了第一段用电高峰,对第二段用电高峰时的用电量进行了削减;需求响应 f_3 与 f_5 为了使负荷贴近光伏出力曲线,削减了第一段用电高峰时的用电量,增加了第二段用电高峰时的用电量,同时也对21:00—24:00用电低谷的用电量进行进一步的削减。

考虑到受气候、地形等环境条件的约束,会对各类型微源所能配置的数量有一定的限制,为了使微电网在各种风光容量占比的配置条件下都能将成本降到最低,本算例通过更改微源安装数量的约束以及需求响应策略,得到多组在不同风光容量占比、不同需求响应策略下的微电网配置运行成本,并对这些数据进行拟合,结果如图12所示。

分析 f_2 与 f_3 、 f_4 与 f_5 可以看出,在光伏容量占比较小的微电网中,选择以最小化电负荷波动为需求响应策略能降低微电网的配置运行成本,平均降低

了1.55万元,平均下降幅度为5.31%;而在光伏容量占比较大的微电网中,则选择以最贴近光伏出力曲线为需求响应策略更能降低微电网的配置运行成本,平均降低了1.76万元,平均下降幅度为6.12%。对比 f_2 与 f_4 、 f_3 与 f_5 可以看出,当在需求响应策略中考虑用户购电成本时,微电网的配置运行成本会在原基础上有略微上升,平均上升了分别0.06万元和0.23万元,上升幅度分别约为0.12%和0.82%。

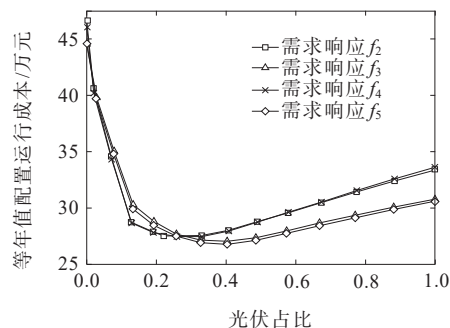


图12 不同光伏占比情况下微电网配置运行成本
Figure 12 Diagram of operating costs of microgrid configurations with different PV shares

综上所述,需求响应策略是针对微源配置实际条件,以降低成本为目标的定制方案。在光伏容量占比较低时,策略重点是减少电负荷波动,确保供电稳定。随着光伏容量占比的增加,策略转向跟随光伏出力曲线,提高能源效率。转换点约在光伏占比26%处。此外,本文策略还考虑了用户购电成本,虽增加微电网成本,但不影响整体经济性,且提升用户用电体验。

5 结语

本文基于MSW管理和可再生发电系统,构建了一个以等年值配置运行成本、能源浪费率、负荷缺电率最小为目标的多目标微电网优化配置模型,并考虑了需求响应策略,通过对算例的对比分析,为健全的废弃物管理系统的建设和需求响应策略的选取提供理论依据。

1) 在现行垃圾分类制度下,针对不同类型的废弃物,使用恰当的生物质技术进行处理,可以达成资源的有效再利用。

2) 与传统的微电网相比,MSW管理和可再生发电系统可作为微电网的灵活性调节资源,具备根据供需平衡进行调节的能力,有效地增强了微电网的自主运行能力,使微电网具有更高的可靠性和生态经济效益。

3) 在需求响应策略的制定中,考虑了微源配置的环境约束,将不同需求响应策略对不同风光容量比例的微电网配置成本的影响进行了灵敏性分析,为能源调度部门的权衡制定需求响应策略提供了科学依据和指导。

参考文献:

- [1] 郝飞,袁贞,袁志彬,等.离网型微电网稳态功率控制策略研究与实践[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):173-179.
HAO Fei, YUAN Zhen, YUAN Zhibin, et al. Research and practice on off-grid microgrid steady power control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 173-179.
- [2] 陈寒,唐忠,鲁家阳,等.基于CVaR量化不确定性的微电网优化调度研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):105-115.
CHEN Han, TANG Zhong, LU Jiayang, et al. Research on optimal dispatch of a microgrid based on CVaR quantitative uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 105-115.
- [3] 唐程辉,张凡,张宁,等.考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(15):18-25+63.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power system considering renewable power uncertainty and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 18-25+63.
- [4] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等.面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(3):663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [5] 边晓燕,姜莹,赵耀,等.高渗透率可再生能源微电网的风柴荷协调调频策略[J].电力系统自动化,2018,42(15):102-109.
BIAN Xiaoyan, JIANG Ying, ZHAO Yao, et al. Coordinated frequency regulation strategy of wind, diesel and load for microgrid with high-penetration renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 102-109.
- [6] 丁宽,仲兆平,余露露,等.城市固体废弃物混合热解特性及动力学[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(1):130-135.
DING Kuan, ZHONG Zhaoping, YU Lulu, et al. Pyrolysis characteristics and kinetic study of mixed pyrolysis of municipal solid waste[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 130-135.
- [7] RAHBARI-ASR N, ZHANG Y, CHOW M Y. Consensus-based distributed scheduling for cooperative operation of distributed energy resources and storage devices in smart grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1268-1277.
- [8] 张志文,李华强.考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):97-105.
ZHANG Zhiwen, LI Huaqiang. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97-105.
- [9] SONG Q B, WANG Z S, LI J H. Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau[J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 57: 92-100.
- [10] SINGH A, BASAK P. Economic and environmental evaluation of municipal solid waste management system using industrial ecology approach: Evidence from India[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 10-20.
- [11] CUDJOE D, HAN M S, CHEN W M. Power generation from municipal solid waste landfilled in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Energy, 2021, 217: 119393.
- [12] 阎怀东,马汝祥,柳志航,等.计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):71-80.
YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 71-80.
- [13] NIKZAD M, SAMIMI A. Integration of designing price-based demand response models into a stochastic bi-level scheduling of multiple energy carrier microgrids considering energy storage systems[J]. Applied Energy, 2021, 282: 116163.
- [14] 崔杨,张家瑞,王铮,等.计及价格型需求响应的风-光-光热联合发电系统日前调度策略[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3103-3114.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3114.
- [15] 南斌,董树锋,唐坤杰,等.考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J].电网技术,2023,47(4):1340-1352.
NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340-1352.

- [16] 魏震波,张海涛,魏平桢,等.考虑动态激励型需求响应的微电网两阶段优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):1-10.
WEI Zhenbo, ZHANG Haitao, WEI Ping'an, et al. Two-stage optimal dispatching for microgrid considering dynamic incentive-based demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 1-10.
- [17] 杨晓辉,袁志鑫,肖锦扬,等.考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J].电力系统保护与控制,2023,51(4):22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [18] 檀勤良,梅书凡,代美,等.基于动态响应电价的微电网优化调度研究[J].价格理论与实践,2021(11):173-176+200.
TAN Qinliang, MEI Shufan, DAI Mei, et al. Optimized scheduling research based on dynamic response electricity price[J]. Price: Theory & Practice, 2021(11): 173-176+200.
- [19] 张星星,焦彭博,杨汇莹,等.剩余污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化研究进展[J].中国环境科学,2022,42(5):2179-2194.
ZHANG Xingxing, JIAO Pengbo, YANG Huiying, et al. Recent advances in anaerobic co-digestion of excess sludge and food waste[J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2179-2194.
- [20] 杨逸如,沈中杰,刘海峰.高炉-气化炉耦合流程的工艺分析[J].煤炭转化,2022,45(3):34-41.
YANG Yiru, SHEN Zhongjie, LIU Haifeng. Process analysis on blast furnace-gasifying furnace coupling process[J]. Coal Conversion, 2022, 45(3): 34-41.
- [21] 陈倩,王维庆,王海云.计及需求响应和混合博弈含多微电网主动配电网协调优化[J].电力系统自动化,2023,47(9):99-109.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Coordinated optimization of active distribution network with multiple microgrids considering demand response and mixed game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 99-109.
- [22] 范添圆,王海云,王维庆,等.计及主/被动需求响应下基于合作博弈的微网-配电网协调优化调度[J].电网技术,2022,46(2):453-463.
FAN Tianyuan, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Coordinated optimization scheduling of microgrid and distribution network based on cooperative game considering active/passive demand response[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 453-463.
- [23] 朱翰超,马蕊.考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):139-146.
ZHU Hanchao, MA Rui. Optimal configuration method of CCHP microgrid considering demand side management [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 139-146.
- [24] 赵波,李得民,吴在军,等.基于100%绿色能源供电目标的海岛微电网群容量优化配置[J].中国电机工程学报,2021,41(3):932-946.
ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-946.
- [25] GB/T 36274-2018.微电网能量管理系统技术规范[S].
GB/T 36274-2018. Technical specification for energy management system of microgrids[S].
- [26] 杨世博,孙亮,陈立东,等.计及分时电价的含冷热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J].电力自动化设备,2021,41(4):15-23.
YANG Shibo, SUN Liang, CHEN Lidong, et al. Coordinated optimal scheduling of distribution network with CCHP-based microgrid considering time-of-use electricity price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 15-23.