

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.01.009

基于遗传算法的分布式多能互补能源系统 优化配置

Optimized allocation of multi-energy complementary distributed energy system
based on genetic algorithm

章文浦¹, 王强钢²
ZHANG Wenpu¹, WANG Qianggang²

(1. 中国电建集团江西省电力建设有限公司, 南昌 330001; 2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术
国家重点实验室, 重庆 400044)

(1. Power China Jiangxi Electric Power Construction Company Limited, Nanchang 330001, China; 2. Chongqing
University State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Safety and New Technology,
Chongqing 400044, China)

摘要: 分布式多能互补能源系统将分布式能源和多能互补系统相结合, 可以实现能源的梯级利用, 对其进行容量优化配置研究, 可以达到节能减排的目的。结合新能源供能现状, 综合讨论了风力发电模型、光伏发电模型、燃气轮机模型、冷热设备模型, 构建了以经济性、环保性和节能性最优为目标的用户侧分布式多能互补能源系统综合评价指标, 通过遗传算法对系统中的燃气轮机、风机和光伏容量进行优化。最后将该模型运用于泰兴虹桥工业园区, 得到了综合运行指标最优的系统配置方案。

关键词: 分布式多能互补能源系统; 综合能源; 用户侧; 遗传算法; 优化配置; 综合运行指标

中图分类号: TM 727.2; TK 01*9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)01-0052-07

Abstract: Integrating distributed energy with multi-energy complementary systems, multi-energy complementary distributed energy system (MCDES) achieves energy cascade utilization, optimized the allocation of their capacities, and realizes energy saving and pollutant reduction. Under current situation of new energies, analyzing wind power generation models, photovoltaic power generation models, gas turbine models and cooling and heating equipment models comprehensively, a user-side MCDES is set up and takes economy, environment protection and energy saving as its evaluation indicators. The capacities of the gas turbine, wind turbine and photovoltaic panel in the system are optimized by genetic algorithm. Finally, the optimization model is applied to Taixing Hongqiao Industrial Park, and its configuration with the optimal comprehensive operating indicators is obtained.

Keywords: multi-energy complementary distributed energy system; integrated energy; user side; genetic algorithm; optimal configuration; comprehensive operation indicator

0 引言

当前, 人类对化石能源的过度使用导致环境污染、能源短缺等问题日益突出, 如何平衡好经济发展、能源利用与环境保护之间的关系成为亟待解决的问题^[1-2], “开源节流”是其中被普遍认可的一个理念^[3]。分布式多能互补能源系统 (Multi-energy Complementary Distributed Energy System, MCDES)

以高效、低污染的特性成为“开源节流”中的重要组成部分。其中: “开源”是指为了促进新能源的消纳, 灵活运用地热能、风能、光能等可再生能源, 构成新能源微网、智能能源系统、综合能源系统等; “节流”则是减少能源传输使用过程中的损耗, 提高能源利用率^[4]。

传统分布式能源系统和风能、光能等新能源发电技术结合, 构成 MCDES, 能够达到节能减排的目的, 实现经济社会的可持续发展, 因此, 进行 MCDES 优化配置方法的研究, 具有很好的理论意义与工程运用价值。在用户侧设计运行的 MCDES 可为用户

提供电能、热能和冷能等多样化能源,系统集成冷热电三联供、可再生能源、天然气等能源输入设备,实现发电、短距离输电和储能等,以提高能源利用率,减少能源浪费与环境污染^[5-7]。用户侧微 MCDES 位于能源互联网的末端,是一种微型分布式能源互联系统,“源”和“荷”距离较近,因此可以充分利用就近新型能源,降低用户的综合用能成本,提高能源利用效率^[8-9]。

本文针对用户侧 MCDES,结合新能源供能现状,以该系统经济性指标、环保性指标和节能性指标最优为目标,同时对系统内风机、光伏设备、燃气轮机和冷热设备进行数学建模,通过遗传算法求解,提出了一种面向用户侧 MCDES 的容量优化配置模型。最后,将该模型运用到虹桥工业园区上,得到综合运行指标最优的系统配置方案。

1 MCDES 结构及微源模型

1.1 用户侧 MCDES

本文讨论的用户侧 MCDES 一般可以划分为能量生产单元、能量转换单元、能量存储单元和用能单元。图 1 为用户侧 MCDES 的能量流动图,系统由上级主电网输入电能,同时从外部获取太阳能和天然气。

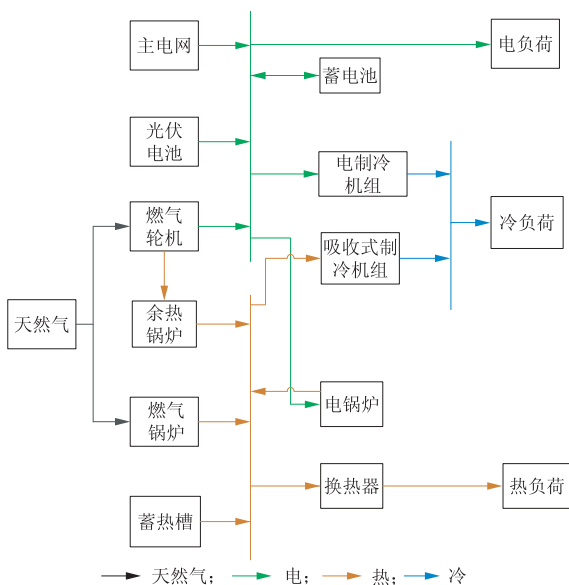


图 1 用户侧 MCDES 能量流动

Fig. 1 Energy flow of the user-side MCDES

用户侧 MCDES 的能源生产单元主要包括燃气轮机、燃气锅炉和光伏电池等发电、产热装置,为用户提供生产生活所需的电能和热能。能源转换单元包括余热锅炉、吸收式制冷机组、电制冷机等,该单元对能源进行转换,使不同能流相互耦合转换,满足用户的不同能源需求。能源存储单元包括蓄

电池和蓄热槽,分别储电和储热,该单元可以充分消纳系统的产能,实现能源的跨时段转移,削峰填谷。用能单元主要指用户侧 MCDES 终端的用户,用户的能源需求通常为电、热、冷 3 种^[10]。

用户侧 MCDES 主要由 3 个能量平衡公式组成,分别是总燃气耗量平衡方程式、电能供需平衡方程式和热能供需平衡方程式。

$$\begin{cases} F_{\text{grid}}(t) = F_{\text{pgu}}(t) + F_b(t) \\ E_w(t) + E_p(t) + E_{\text{pgu}}(t) + E_{\text{grid}}(t) = E_{\text{ec}}(t) + E(t), (1) \\ Q_r(t) + Q_b(t) = Q_{\text{ha}}(t) + Q_{\text{hh}}(t) \end{cases}$$

式中: $F_{\text{grid}}(t)$ 为燃气管网 t 时刻输出的天然气能; $F_{\text{pgu}}(t)$, $F_b(t)$ 为燃气轮机、燃气锅炉 t 时刻消耗的天然气热能; $E_w(t)$, $E_p(t)$ 为 t 时刻的风机、光伏出力; $E_{\text{pgu}}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机出力; $E_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻系统与电网之间的交互功率; $E_{\text{ec}}(t)$ 为电制冷机制冷耗电量; $E(t)$ 为纯电负荷; $Q_r(t)$, $Q_b(t)$ 为 t 时刻余热锅炉和燃气锅炉的制热功率; $Q_{\text{ha}}(t)$, $Q_{\text{hh}}(t)$ 为 t 时刻进入制冷机和减温减压器的冷热功率。

1.2 系统模型

1.2.1 风力发电模型

通过图 2 可知:当风速 v 高于切入风速 v_{in} 时,才有相应的功率输出用于发电,风速低于 v_{in} 时风力发电机不会启动;当风速介于 v_{in} 和额定风速 v_N 之间时,风机出力逐渐增大;当风速达到 v_N 且小于切出风速 v_{out} 之后,风机出力稳定在风机额定输出功率 P_N 上;风速继续增大至大于 v_{out} 后,风机则停止工作。

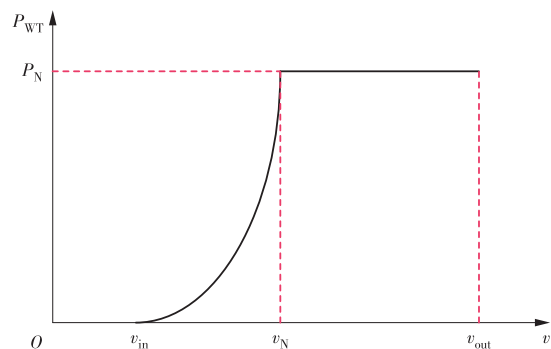


图 2 风机功率-风速曲线

Fig. 2 Curve of wind power-wind speed

根据曲线可得风力发电机风速和功率的关系

$$P_{\text{WT}} = P_N \frac{v - v_{\text{in}}}{v_N^3 - v_{\text{in}}^3} \quad (2)$$

式中: P_{WT} 为风机的实时功率。

1.2.2 光伏发电模型

光伏组件通过半导体将太阳能转化为电能。光伏组件的功率、温度与组件接受的太阳辐射量有关^[11-12]。其中光伏组件温度由环境温度、光伏组件

接受的太阳辐射量及安装条件决定,具体公式如下

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{AC}}{G_{STC}} [1 + k_t(t_c - t_r)], \quad (3)$$

式中: k_t 为功率温度系数,取 $-0.47\%/^{\circ}\text{C}$; t_c 为光伏组件温度; t_r 为参考温度,取 25°C ; G_{AC} 为光伏组件接受的太阳辐射量, W/m^2 ; G_{STC} 为标准测试条件下的光照强度,取 $1\,000\text{ W}/\text{m}^2$; P_{STC} 为光伏组件的最大测试功率。

1.2.3 燃气轮机模型

燃气轮机模型将特定的化学能转化为有用功,借助稳定流动的气体,通过叶轮来驱动其高速旋转。燃气轮机消耗的天然气可以用下式表示

$$F_{\text{pgu}} = \frac{E_{\text{pgu}}}{\eta_{\text{pgu}}}, \quad (4)$$

式中: F_{pgu} 为燃气轮机消耗的天然气量; E_{pgu} 为燃气轮机发电量; η_{pgu} 为燃气轮机发电效率。

1.2.4 冷热设备模型

(1)电制冷机模型。制冷机是主要的制冷设备,将热量从温度较低的冷却物体传递到环境介质中获得冷量,用来满足系统中的冷能需求。电制冷机容量可用下式表示

$$N_{\text{ec}} = \lambda Q_{\text{c max}}, \quad (5)$$

式中: N_{ec} 为电制冷机容量; λ 为电制冷机制冷量占总冷负荷需求的比值; $Q_{\text{c max}}$ 为用户的冷负荷需求。

(2)吸收式制冷机模型。吸收式制冷机通常以溴化锂水溶液作为吸收剂,具有良好的调节性,将水制冷供给中央空调系统等,吸收式制冷机容量为

$$N_{\text{ac}} = (1 - \lambda) Q_{\text{c max}}, \quad (6)$$

式中: N_{ac} 为吸收式制冷机容量。

(3)余热锅炉模型。余热锅炉利用工业过程中废气、废液的余热将水加热来提供热能^[13],产生的热量为

$$Q_r = F_{\text{pgu}} \eta_{\text{rec}} (1 - \eta_{\text{pgu}}), \quad (7)$$

式中: η_{rec} 为余热锅炉效率。

(4)燃气锅炉模型。燃气锅炉是联供系统中的备用热源,将天然气转化为热能^[14]。燃气锅炉消耗天然气转化为热能可以表示为

$$F_b = \frac{Q_b}{\eta_b} = \frac{Q_{\text{hh}} + Q_{\text{ha}} - Q_r}{\eta_b}, \quad (8)$$

式中: F_b 为燃气锅炉消耗的天然气; Q_b 为燃气锅炉产生的热量; η_b 为燃气锅炉效率; Q_{hh} 为进入减温减压器的热量; Q_{ha} 为进入溴化锂吸收式制冷机的热量。

2 MCDES评价指标

2.1 经济性指标

本文采用动态评价法,将某一时刻的流入与流

出资金换算为该时刻的资金价值。

(1)年初投资成本。MCDES和分供(Separation Production, SP)系统中的年初投资成本 C_{AC} 受投资回收系数 R 、年利率 r 、设备残值率 g 、单位容量的初投资费用 C_k (元/MW)以及容量 N_k (MW)的影响,具体表达式如下

$$\begin{cases} C_{\text{AC}}^{\text{M}} = [R(1 - g) + rg] \sum_{k=1}^K N_k^{\text{M}} C_k^{\text{M}} \\ C_{\text{AC}}^{\text{SP}} = [R(1 - g) + rg] \sum_{k=1}^K N_k^{\text{SP}} C_k^{\text{SP}} \\ R = \frac{r(1 + r)^y}{(1 + r)^y - 1} \end{cases}, \quad (9)$$

式中:上标M代表MCDES;上标SP代表SP系统; K 为设备总台数; y 为设备寿命。

若无特别说明,本文设定年利率 r 为8%,设备残值率 g 为0,各设备寿命 y 均为20年。MCDES中各设备单位容量初投资成本见表1。

表1 MCDES中各设备单位容量初投资成本

Tab. 1 Initial investment cost per unit capacity of the equipment in MCDES 万元/MW

设备名称	单位容量初投资成本
分布式风机	570.0
分布式光伏	410.0
燃气轮机	268.0
余热锅炉	78.0
燃气锅炉	60.0
吸收式制冷机	103.0
电制冷机	61.2

(2)年维护成本。系统中各设备的年维护成本 C_{AM} 与很多因素相关,其中最关键的是设备运行方式。考虑年维护成本与各设备初投资成本的比值为 β ,取值0.03。

$$\begin{cases} C_{\text{AM}}^{\text{M}} = \beta \sum_{k=1}^K N_k^{\text{M}} C_k^{\text{M}} \\ C_{\text{AM}}^{\text{SP}} = \beta \sum_{k=1}^K N_k^{\text{SP}} C_k^{\text{SP}} \end{cases}. \quad (10)$$

(3)年运行成本。系统的年运行成本 C_{AO} 由燃气设备消耗的天然气费用和从外部购入的电费组成,以年为单位则有

$$\begin{cases} C_{\text{AO}}^{\text{M}} = \sum_{m=1}^3 \left[D(m) \sum_{t=1}^{24} C_{\text{AO}t}^{\text{M}} \right] \\ C_{\text{AO}}^{\text{SP}} = \sum_{m=1}^3 \left[D(m) \sum_{t=1}^{24} C_{\text{AO}t}^{\text{SP}} \right] \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $D(m)$ 为典型季节的天数。

由此可以得到MCDES和SP系统年初投资成本、年维护成本以及年运行成本的总和 C_{AT}

$$\begin{cases} C_{AT}^M = C_{AC}^M + C_{AM}^M + C_{AO}^M \\ C_{AT}^{SP} = C_{AC}^{SP} + C_{AM}^{SP} + C_{AO}^{SP} \end{cases} \quad (12)$$

2.2 环保性指标

本文采用 CO₂ 排放量 m_{CO_2} 作为环保性的评价指标。

MCDES 和 SP 系统年 CO₂ 排放量为

$$\begin{cases} m_{CO_2}^M = \sum_{m=1}^3 \left[D(m) \sum_{t=1}^{24} m_{CO_2,t}^M \right] \\ m_{CO_2}^{SP} = \sum_{m=1}^3 \left[D(m) \sum_{t=1}^{24} m_{CO_2,t}^{SP} \right] \end{cases} \quad (13)$$

引入环境成本系数 α , 将 CO₂ 的排放量转化为经济数值, 组成目标函数的一部分, 转化后可以表示为

$$C_{CO_2}^M = \alpha m_{CO_2}^M \quad (14)$$

2.3 节能性指标

本文通过比较系统的一次能源利用率来反映节能性。一次能源利用率 R_{PE} 是指系统 1 年输出的冷、热、电能与一次能源消耗量之比。MCDES 和 SP 系统的一次能源利用率可用下式表示

$$\begin{cases} R_{PE}^M = \frac{Q_c + Q_h + E}{Q_f^M} \\ R_{PE}^{SP} = \frac{Q_c + Q_h + E}{Q_f^{SP}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: Q_f 为系统总的一次能源消耗量。

3 MCDES 优化模型

3.1 目标函数

本文从节能性、经济性和环保性 3 个方面综合考虑 MCDES 的设计优化效果。环保性方面, 本文将 CO₂ 排放量通过环境成本系数 α 换算为经济成本, 从而与设备的初始投资成本、维护成本和运行成本相结合, 直观地从经济角度来反映系统的优化结果。具体的目标函数为

$$F = C_{AO}^M + C_{AC}^M + C_{AM}^M + C_{CO_2}^M, \quad (16)$$

式中: F 为年度总成本。

3.2 约束条件

(1) 系统的电热量平衡约束。

$$\begin{cases} E_w(t) + E_p(t) + E_{pgu}(t) + E_{grid}(t) = E_{ec}(t) + E(t) \\ Q_r(t) + Q_h(t) = Q_{ha}(t) + Q_{hh}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)为电能供需平衡方程和热能供需平衡方程, 分别表示: t 时刻风机出力、光伏出力、燃气轮机出力以及系统与电网的交互能量之和应与电制冷机制冷时的耗电量、纯电负荷之和相等; 余热锅炉和燃气锅炉制热功率之和应与制冷机和减温减

压器吸收的冷热功率相等。

(2) 设备输入、输出约束条件。

$$\begin{cases} H_i \geq 0 \\ 0 \leq P_i \leq N_i \eta_i \end{cases} \quad (18)$$

式中: H_i 为第 i 个设备的输入功率, 要时刻大于或等于 0; P_i 为第 i 个设备的输出功率, 介于 0 和相应运行系数下的设备容量之间; N_i 为第 i 个设备的容量; η_i 为设备运行状态, 取值 0 或 1。

(3) 优化变量约束。

$$\begin{cases} F_{\max} \geq 0 \\ 0 \leq \lambda \leq 1 \\ S_{wt} \geq 0 \\ S_{pv} \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $F_{\max}$ 为燃气轮机容量; S_{wt} , S_{pv} 分别为风机、光伏容量。

3.3 求解方法

本文采用罚函数法^[15]对约束条件进行处理, 借助罚函数把约束问题转化为无约束问题, 进而用无约束最优化方法求解约束问题, 算法实现如下。

(1) 数据初始化。输入分布式风机、光伏、燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、吸收式制冷机、电制冷机的投资成本、运维成本等参数。

(2) 种群初始化。初始化种群中每个个体对应一个优化配置方案中设备的容量, 本文采用实数编码的方式, 个体可直接用优化变量 X 表示

$$X = [S_1, S_2, \dots, S_N] \quad (20)$$

式中: N 为种群个体数目; S 为设备容量。

(3) 计算种群个体的适应度, 这里考虑将带罚函数的目标值作为个体 k 的适应度 F_k 。

(4) 选择操作。本文采用轮盘赌法进行选择, 即基于适应度比例的选择策略, 个体 k 被选择的概率为

$$\begin{cases} f_k = 1/F_k \\ p_k = f_k / \sum_{k=1}^N f_k \end{cases} \quad (21)$$

式中: p_k 为个体 k 被选择的概率。

由于适应度值越小越好, 所以在个体选择之前对适应度值求倒数。

(5) 交叉操作。交叉操作采用算术交叉法, 个体 x_i 和 x_j 的交叉操作方法如下

$$\begin{cases} x'_i = x_i(1-b) + x_j b \\ x'_j = x_j(1-b) + x_i b \end{cases} \quad (22)$$

式中: x'_i , x'_j 分别为随机选择的个体经过交叉操作后的新个体; b 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

(6) 变异操作。个体 x_i 变异的操作方法如下

$$x_i' = \begin{cases} x_i + \Delta(x_i - x_{\max})f(h) & rand \geq 0.5 \\ x_i + \Delta(x_{\min} - x_i)f(h) & rand < 0.5 \end{cases}, \quad (23)$$

$$f(h) = s(1 - h/G_{\max}), \quad (24)$$

式中: $x_{\max}$, $x_{\min}$ 分别为 x_i 的上界和下界; $rand$ 为 $[0, 1]$ 间的随机数; s 为随机数; h 为当前迭代次数; $G_{\max}$ 为最大进化次数。

(7) 判断是否满足终止进化准则, 如不满足, 则转到步骤 (3)—(6)。

(8) 输出优化配置方案。

4 算例分析

本文选择位于江苏省的泰兴虹桥工业园区作为分析对象进行优化配置研究。虹桥工业园区位于苏中地区, 是典型的亚热带季风气候, 风能资源和太阳能资源都较为丰富。工业园区作为城市中能耗的主要聚集地, 其能源需求主要有电、热、冷。园区内多为工厂、仓储或办公楼, 加之江苏地区经济发展成熟, 有较大的供能需求, 因此适合在园区发展用户侧 MCDES。

4.1 风能、太阳能资源分析

虹桥工业园区 120 m 处风塔平均风速为 5.31 m/s, 风功率密度为 125.5 W/m², 根据相关风能资源评估办法, 该风电场测风塔附近轮毂高度处的风功率密度为 1 级, 适合发展风电项目。该园区考虑的是 2.0~2.5 MW 的风力发电机组, 风轮直径为 120~140 m, 塔高 100~150 m。WTG3 风力发电机组是较为合适的选择且数量定为最多 20 台。

工业园区处于光照充足的地区, 太阳能资源较为丰富, 年平均日照小时数为 1 984.5。园区的可用建筑屋顶面积为 42 240 m², 光伏组件采用平铺式安装方式, 园区光伏发电系统最大容量为 40 MW。

4.2 园区典型日冷、热、电负荷分析

与上文讨论的不同典型日下风机和光伏出力对应, 选择旺季 (3—5 月, 8—12 月)、过渡季 (6—7 月)、淡季 (1—2 月) 的典型日冷、热、电负荷, 如图 3 所示。

园区中对冷负荷的需求主要是用于冷冻水, 旺季、过渡季和淡季对冷负荷的需求相对稳定, 由于过渡季处于夏天, 所以对冷负荷的需求要稍高一些。工业园区中的热负荷主要是为了满足生产需求, 属于蒸汽热负荷, 生活热水负荷的比例很小, 尽量要求 24 h 生产, 所以各季对热负荷的需求也是相对稳定的。由图 3 可见, 3 季对电负荷需求的变化趋势相似, 为了尽可能降低生产成本, 许多企业夜间生产多于白天, 所以 00:00—07:00 的电负荷需求明

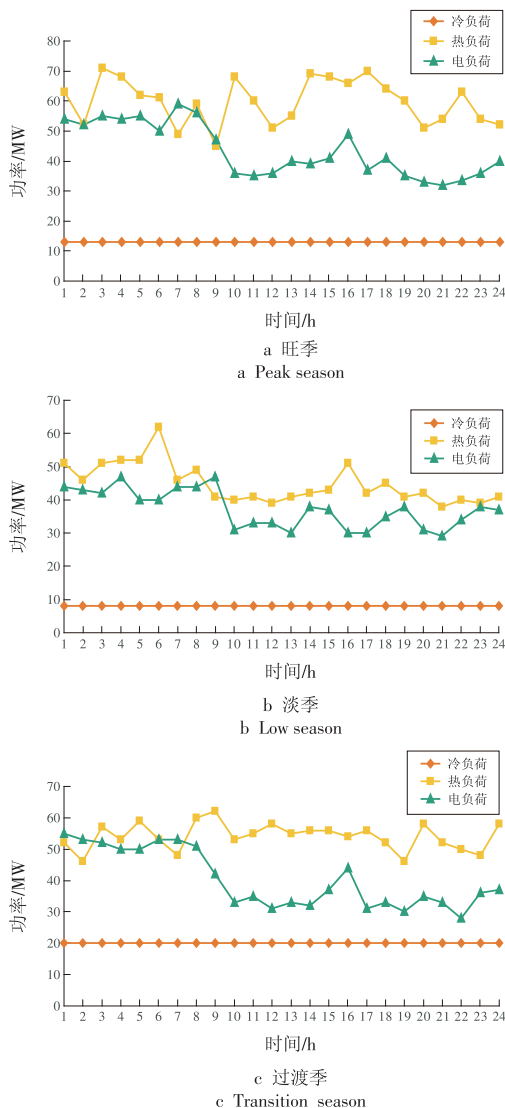


图 3 旺季、淡季、过渡季工业园区各负荷曲线
Fig. 3 Load curves of the industrial park in peak season, low season and transition season

显大于 08:00—23:00。

4.3 系统参数取值

选取该园区旺季、过渡季、淡季各 1 个典型日的冷、热、电负荷进行优化配置计算。峰谷分时电价为: 高峰时段 1.069 7 元/(kW·h), 平时期段 0.641 8 元/(kW·h), 低谷时段 0.313 9 元/(kW·h)。国家对天然气价格有相应的优惠政策, 工业天然气价格是 3.65 元/m³, 高位发热值为 38.122 7 MJ/m³, 低位发热值为 34.349 6 MJ/m³。MCDES 中设备性能参数见表 2。

4.4 系统容量优化配置结果分析

各设备配置后的最优容量见表 3, 遗传算法的目标函数优化曲线如图 4 所示。在相同的设备和性能参数下, SP 系统的目标函数优化曲线如图 5 所示。

表 2 MCDES 中设备性能参数

Tab. 2 Performance parameters of the equipment in MCDES

项目	参数
燃气轮机发电效率	0.3
电制冷机循环倍率	3.0
燃烧天然气的 CO ₂ 排放系数/[kg·(MW·h) ⁻¹]	200
环境成本系数	0.018
余热锅炉效率	0.7
吸收式制冷机循环倍率	1.2
购电的 CO ₂ 排放系数/[kg·(MW·h) ⁻¹]	861

表 3 MCDES 优化配置结果

Tab. 3 Optimized capacities in MCDES

设备名称	容量/MW
分布式风机	23.00
分布式光伏	38.00
燃气轮机	85.00
燃气锅炉	232.41
吸收式制冷机	19.50
电制冷机	45.50

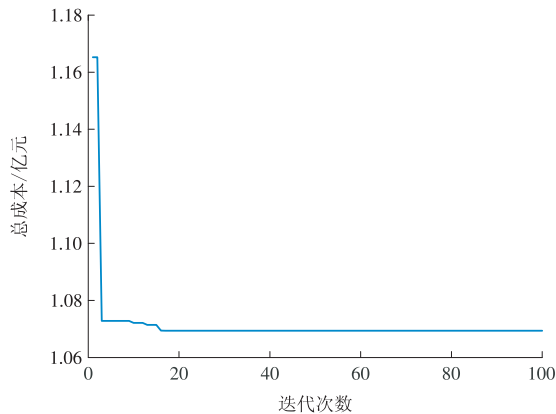


图 4 MCDES 目标函数优化曲线

Fig. 4 Optimization curve of MCDES objective function

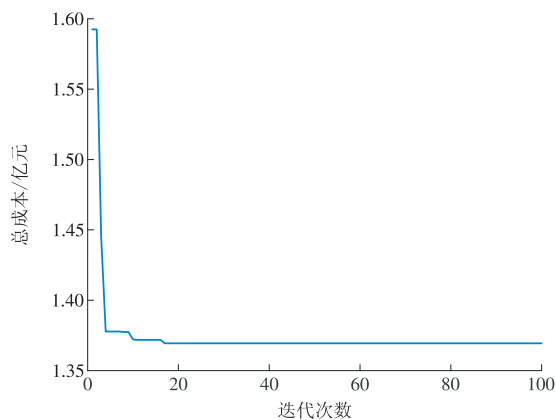


图 5 SP 系统目标函数优化曲线

Fig. 5 Optimization curve of SP system objective function

经过优化配置后,得到 2 种系统的年总成本、初始投资成本、年维护成本、年运行成本和年 CO₂ 排放成本,如图 6 所示。

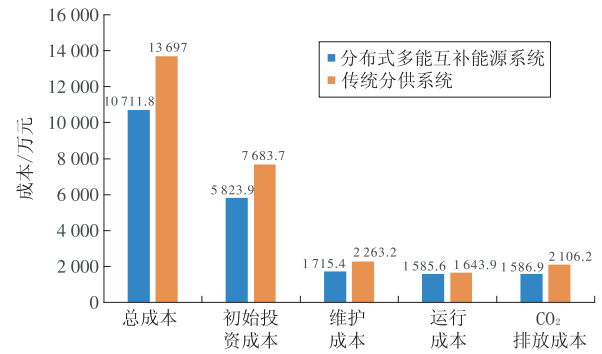


图 6 MCDES 和 SP 系统优化后各项成本

Fig. 6 Costs of each item in MSDES and SP system after optimization

通过分析优化配置结果可得,MCDES 的各项成本均低于 SP 系统。初始投资成本由风力发电机、光伏发电机和燃气轮机的投资成本组成,经过优化配置,MCDES 中这 3 种投资成本分布较均衡,其初始投资成本比 SP 系统低 24.20%,而 SP 系统更加依赖燃气轮机和风机,增加了投资成本;同时,维护成本与初始投资成本成正比,所以 MCDES 的维护成本也要低于 SP 系统。运行成本主要由运行过程中消耗的天然气费用和向外购电的费用组成,MCDES 也更有优势。另外,MCDES 的 CO₂ 排放成本也明显减少,比 SP 系统低 24.66%,表明优化配置的 MCDES 环保性更佳。本文用一次能源利用率来评价系统的节能性,MCDES 中一次能源利用率为 47.86%,SP 系统则为 36.79%。

综上所述,从经济性、环保性和节能性 3 项指标来评价,MCDES 优势非常明显,有显著的工程运用价值和实践意义。

5 结束语

本文在综合了经济、环境和设备运行特性等影响因素的基础上,研究了 MCDES 中常见的风力发电模型、光伏发电模型、燃气轮机模型的工作原理和出力;给出了优化配置过程中的评价指标,使用遗传算法从经济性、环保性和节能性 3 个方面对分布式多能互补能源系统进行了优化配置。以江苏虹桥工业园区为例进行分析,将 MCDES 和 SP 系统的设备初始投资成本、维护成本、运行成本、CO₂ 排放成本、一次能源消耗量进行比较,结果表明,与 SP 系统相比,MCDES 的各项指标都有明显的优势。

参考文献:

- [1] CHOWDHURY A A, KOVAL D O. Generation reliability impacts of industry-owned distributed generation sources [C]// 38th IAS Annual Meeting, 2003: 1321-1327.

- [2]孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020(4): 79-88.
- SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load [J]. Electric Power, 2020(4): 79-88.
- [3]ZHENG J H, CHEN J J, WU Q H, et al. Multi-objective optimization and decision making for power dispatch of a large-scale integrated energy system with distributed DHCs embedded[J]. Applied Energy, 2015, 154(9): 369-379.
- [4]NISKAYUNA B, KROPOSKI D G. Power quality protection and reliability case studies report [R]. Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2003: 15-20.
- [5]崔全胜, 白晓民, 董伟杰, 等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 4967-4981.
- CUI Quansheng, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Joint optimization of planning and operation in user-side multi-energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 4967-4981.
- [6]韩峰, 张衍国, 严矫平, 等. 综合能源服务业务和合作模式[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 1-4.
- HAN Feng, ZHANG Yanguo, YAN Jiaoping, et al. Integrated energy service and cooperation modes [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 1-4.
- [7]武志军. 综合能源服务下新能源集约化管控评价方法[J]. 华电技术, 2019, 41(12): 68-71.
- WU Zhijun. Evaluation method on new energy intensive management for integrated energy services [J]. Huadian Technology, 2019, 41(12): 68-71.
- [9]李德智, 龚桃荣. 用户侧多能互补微能源网的规划方法[J]. 中国电力, 2019(11): 68-76.
- LI Dezhi, GONG Taorong. Planning method of multi-energy complementary micro energy grid on user side [J]. Electric Power, 2019(11): 68-76.
- [9]杜炬虎, 刘静. 园区燃气分布式能源站微电网结构解析[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 23-25.
- DU Juhu, LIU Jing. Analysis of microgrid structure of a gas distributed energy station in a park [J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 23-25.
- [10]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.
- [11]于波, 吴亮, 卢欣, 等. 区域综合能源系统优化调度方法[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 70-76.
- YU Bo, WU Liang, LU Xin, et al. Optimal dispatching method of integrated community energy system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 70-76.
- [12]李艳红, 王兴兴. 光储充综合能源系统设计及优化[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 76-79.
- LI Yanhong, WANG Xingxing. Design and optimization of solar energy storage and charging in integrated energy systems [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 76-79.
- [13]ZHAO X D, LI F, LIANG J. Research on optimization model and method of a multi-energy complementary combined heat and power system [C]//2018 International Conference on Engineering Simulation and Intelligent Control, 2018.
- [14]林顺富, 刘持涛, 李东东, 等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1409-1421.
- LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1409-1421.
- [15]李海燕, 井元伟, 马明旭, 等. 基于动态罚函数法的协同优化算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(6): 911-915.
- LI Haiyan, JING Yuanwei, MA Mingxu, et al. Collaborative optimization algorithm based on dynamic penalty function method [J]. Control and Decision, 2009, 24(6): 911-915.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

章文浦 (1969—), 男, 江西南昌人, 高级工程师, 从事电力系统、新能源电站、可再生能源和储能系统的规划、咨询、设计、调试及技术管理等方面的工作 (E-mail: zwpzwp6912@126.com)。

王强钢 (1987—), 男, 福建晋江人, 副教授, 工学博士, 从事新能源发电、微网建模分析和运行控制领域的教学和研究工作 (E-mail: qianggang1987@cqu.edu.cn)。