

4-19-2022

## Optimal Operation for Park Integrated Energy System Considering Interruptible Loads

Lixin Ma

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 1022151953@qq.com*

Ying Cheng

*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 1375591359@qq.com*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Optimal Operation for Park Integrated Energy System Considering Interruptible Loads

## Abstract

**Abstract:** The operating mode of thermal power generation units has certain limitations in peak shaving capacity. Interruptible load (IL), as a power resource to be tapped, can be applied to the park integrated energy management and microgrid systems to guide users to reduce peak electricity consumption. *The IL function is introduced into the park integrated energy system with combined heat and power units to improve the system's peak shaving ability, and the corresponding model is established with the optimization goal of economy.* Taking an ecological park of northern region as the example, *the adaptive chaotic particle swarm algorithm is used in the simulation.* The results show that the park microgrid after the introduction IL project can perform peak-shaving operation, and the operating economy and energy supply flexibility are greatly improved. Compared with the traditional algorithms, the adaptive chaotic particle swarm optimization algorithm is better in the optimization result accuracy and optimization efficiency.

## Keywords

combined heat and power, setting electricity by heat, interruptible loads, integrated energy, adaptive chaos particle swarm optimization

## Recommended Citation

Lixin Ma, Ying Cheng. Optimal Operation for Park Integrated Energy System Considering Interruptible Loads[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 817-825.

# 计及可中断负荷的园区综合能源系统优化调度

马立新, 程颖\*

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 热电机组“以热定电”运行时在调峰能力上有一定的局限性, 可中断负荷 (interruptible load, IL) 作为一种待挖掘的电力资源, 可以应用在园区综合能源管理和微网系统中, 引导用户减少高峰用电。在含有热电联产机组的园区综合能源系统中引入IL功能改善系统调峰能力, 以经济性作为集成优化目标, 建立相应模型。以北方某生态园区为算例, 利用自适应混沌粒子群算法进行仿真求解。结果表明: 引入IL功能后的园区微网可以进行削峰运行且运行经济性和供能灵活性均有较大提高。通过与传统算法的比较, 自适应混沌粒子群算法在优化结果精度和优化效率上均更优。

**关键词:** 热电联产; 以热定电; 可中断负荷; 综合能源; 自适应混沌粒子群算法

中图分类号: TP391; TM73

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)04-0817-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0893

## Optimal Operation for Park Integrated Energy System Considering Interruptible Loads

Ma Lixin, Cheng Ying\*

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The operating mode of thermal power generation units has certain limitations in peak shaving capacity. Interruptible load (IL), as a power resource to be tapped, can be applied to the park integrated energy management and microgrid systems to guide users to reduce peak electricity consumption. The IL function is introduced into the park integrated energy system with combined heat and power units to improve the system's peak shaving ability, and the corresponding model is established with the optimization goal of economy. Taking an ecological park of northern region as the example, the adaptive chaotic particle swarm algorithm is used in the simulation. The results show that the park microgrid after the introduction IL project can perform peak-shaving operation, and the operating economy and energy supply flexibility are greatly improved. Compared with the traditional algorithms, the adaptive chaotic particle swarm optimization algorithm is better in the optimization result accuracy and optimization efficiency.

**Keywords:** combined heat and power; setting electricity by heat; interruptible loads; integrated energy; adaptive chaos particle swarm optimization

## 引言

“三北”地区热电联产机组装机比例高, 由于

冬季供热期用户侧热负荷大, 机组一般采用“以热定电”的运行模式, 导致电网系统调峰能力严重受限。在此背景下, 诸多地区开始发展需求侧

收稿日期: 2020-11-13

修回日期: 2020-12-22

第一作者: 马立新(1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性与优化运行、电机控制、智能电网等。

E-mail: 1022151953@qq.com

通讯作者: 程颖(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为综合能源系统优化运行。E-mail: 1375591359@qq.com

响应技术以平滑负荷曲线,缓解电力供需矛盾,实现削峰填谷。高效的需求侧响应技术能够提高系统运行灵活性和能源利用率、降低用能费用。

可中断负荷项目 IL(interruptible load)作为激励型需求响应中的一种重要形式,一般应用于大型工业或商业用户。因其良好的响应速度和削峰性能逐渐受到学者关注。文献[1]研究多元家庭用户的互动调度优化潜力,建立计及家庭能量管理的需求响应调峰模型,能有效提高用户经济性,有助于电网进行调峰。文献[2]将电动汽车视作一种可中断负荷,研究其调峰潜力,构建电动汽车辅助调峰优化模型,算例证明了集群化电动汽车对负荷峰谷有明显的改善作用。文献[3]充分挖掘空调负荷的调峰潜力,建立了公共楼宇空调负荷参与电网调峰的优化调度模型,为改善城市夏季电网经济运行提供了可行的技术支持。但以上研究主要涉及居民及商业用户,园区工业负荷的需求响应问题少有研究。

文献[4]建立计及可中断负荷的日前机组组合优化运行模型,但是模型没有将可再生能源并网情况纳入考虑。文献[5]对多类型需求侧资源的响应机理进行阐述,建立了计及可中断负荷的电力系统优化调度模型,算例结果表明可中断负荷在负荷高峰期调用,降低了火电机组的出力,提高了系统运行的经济性。但对可中断负荷参与调峰的调峰时刻和调峰深度等方面缺少考虑。

因此,本文针对大型园区内的工业负荷,综合考虑可再生能源并网,针对当前热电联产微网以热定电模式下调峰能力差、并网波动大等问题,提出计及IL的园区微网优化调度模型,将系统运行总成本作为目标函数,分计及IL和不计及IL两种场景进行仿真对比,分析可中断负荷参与调峰的调峰时刻和调峰深度。

## 1 园区微网与可中断负荷模型

### 1.1 园区微网结构

综合能源微网具有独立运行以及联络电网运

行的能力,能提升能源利用率,促进新能源发展<sup>[6]</sup>。本文研究的园区微网结构及能量流动的结构示意图,如图1所示,涉及到电、热、气3种能源形式。微网结构主要包含大电网联络线、分布式发电微源、CHP机组、燃气锅炉,以及分布式储能设备。

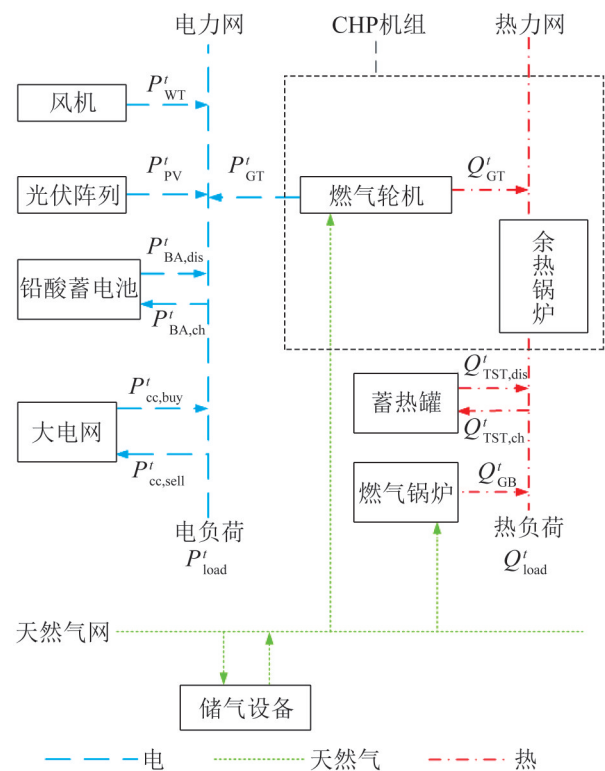


图1 园区微网结构及能量流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of park microgrid structure and energy flow

在保证综合能源系统安全稳定运行的前提下,通过制定合理的各功能设备的调度计划,使得园区微网总运行费用最小。园区微网总运行费用包含机组初始投资费用、运行维护费用、天然气费用,以及电网功率交互费用。

$$\begin{cases} f_{inv} = \left( \sum_{i=1}^N a_i \cdot k_{inv}^i C_i \right) / 365 \\ a_i = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^{year_i}}} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{om} = \sum_{i=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_e} (k_{om,i} \cdot P_i^t) + \sum_{j=1}^{N_g} (k_{om,j} \cdot Q_j^t) \right] \quad (2)$$

$$f_{ng} = k_{ng} \sum_{t=1}^T \left( \frac{P_{GT}^t}{\eta_{GT} L_{gas}} + \frac{Q_{GT}^t}{\eta_{GB} L_{gas}} \right) \quad (3)$$

$$f_{cc} = \sum_{t=1}^T (k_{buy}^t P_{cc,buy}^t - k_{sell}^t P_{cc,sell}^t) \quad (4)$$

式中:  $f_{inv}$  为机组初始投资费用;  $N$  为供能设备的总数量;  $a_i$  为设备  $i$  的资金回收系数;  $r$  为投资利率, 取 5%;  $year_i$  为设备  $i$  的使用寿命;  $k_{inv}^i$  为供能设备  $i$  的单位容量初始投资成本;  $C_i$  为供能设备  $i$  的容量;  $f_{om}$  为机组运行维护费用;  $T$  为调度日内总时段数;  $N_g$  为供电设备数量;  $N_q$  为供热设备数量;  $k_{om,i}$ 、 $k_{om,j}$  分别为供电、热设备的单位运行成本;  $P_i^t$  为第  $i$  个供电设备  $t$  时刻的输出电功率;  $Q_j^t$  为第  $j$  个供热设备  $t$  时刻的输出热功率;  $f_{ng}$  为园区微网的天然气费用;  $k_{ng}$  为购买天然气的单位热值价格;  $L_{gas}$  为天然气热值, 取 9.96 kWh/Nm<sup>3</sup>;  $\eta_{CHP}$  为 CHP 机组的发电效率;  $\eta_{GB}$  为燃气锅炉的产热效率;  $f_{cc}$  为园区微网与大电网的电网交互费用;  $k_{buy}^t$ 、 $k_{sell}^t$  为  $t$  时刻向电网购电和售电的价格;  $P_{cc,buy}^t$ 、 $P_{cc,sell}^t$  为  $t$  时刻向电网购买和售出的电功率。

## 1.2 可中断负荷模型

用户和供电公司综合考虑中断容量、中断次数、中断时间、中断补偿价格事先签订可中断负荷合同, 在负荷高峰时段或系统出现故障时由园区管理中心向用户发出中断请求信号, 用户根据信号减少或中断用电, 以此获得对应补偿。中断补偿费用可以分为 2 部分: ①容量补偿费用: 此费用仅与用户申报的最大中断容量有关; ②电量补偿费用: 该补偿费用在实际调度结束后发生, 由园区管理中心根据用户在实际调度中被中断的电量和合同中规定的电量补偿价格进行核算。

在调度周期内, 可中断负荷的调用费用模型为

$$f_{IL_1} = \sum_{i=1}^{N_{IL}} \beta_{IL,i} Cap_{IL,i} \quad (5)$$

$$f_{IL_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{IL}} E_{IL,i}^t, E_{IL,i}^t = \gamma_{IL,i} P_{IL,i}^t \delta_i^t \quad (6)$$

$$f_{IL} = f_{IL_1} + f_{IL_2} \quad (7)$$

式中:  $f_{IL}$  为调用可中断负荷的总费用;  $f_{IL_1}$ 、 $f_{IL_2}$  分

别为容量补偿总费用和电量补偿总费用;  $\beta_{IL,i}$  为用户  $i$  的单位中断容量补偿价格;  $Cap_{IL,i}$  为用户  $i$  的最大可中断容量;  $E_{IL,i}^t$  为用户  $i$  在  $t$  时刻的电量补偿费用;  $N_{IL}$  为能参加可中断负荷的用户总数;  $\delta_i^t$  为可中断负荷的调用状态, 为 0~1 变量,  $\delta_i^t=1$  表示用户  $i$  在  $t$  时刻参与可中断负荷调用,  $\delta_i^t=0$  表示用户  $i$  在  $t$  时刻不参与可中断负荷调用;  $P_{IL,i}^t$  为用户  $i$  在  $t$  时刻的中断容量;  $\gamma_{IL,i}$  为用户  $i$  的单位中断电量补偿价格。

本文假设可中断负荷中热负荷在用户舒适度范围内进行响应, 不考虑其补偿费用, 只考虑电负荷的补偿费用。

## 1.3 约束条件

(1) 热电功率平衡约束:

$$P_{WT}^t + P_{PV}^t + P_{BA,ch}^t + P_{CHP}^t + P_{cc,sell}^t = P_{load}^t + P_{BA,dis}^t + P_{cc,buy}^t \quad (8)$$

$$Q_{CHP}^t = \alpha P_{CHP}^t \quad (9)$$

$$Q_{GB}^t + Q_{CHP}^t + Q_{TST,ch}^t = Q_{load}^t + Q_{TST,dis}^t \quad (10)$$

式中:  $P_{WT}^t$ 、 $P_{PV}^t$ 、 $P_{CHP}^t$  分别为风机、光伏、CHP 机组  $t$  时刻的输出功率;  $P_{load}^t$ 、 $Q_{load}^t$  分别为  $t$  时刻的电、热负荷;  $P_{BA,ch}^t$ 、 $P_{BA,dis}^t$  分别为铅酸蓄电池  $t$  时刻的充放电功率;  $\alpha$  为 CHP 机组的热电比;  $Q_{GB}^t$ 、 $Q_{CHP}^t$  分别表示燃气锅炉、CHP 机组  $t$  时刻的热输出功率;  $Q_{TST,dis}^t$ 、 $Q_{TST,ch}^t$  分别为蓄热罐  $t$  时刻的蓄放热功率。

(2) 并网点功率约束:

分布式电源供电具有随机性, 为保证微电网供电稳定性, 并网点功率有一定约束范围:

$$r_{min} P_{load}^t \leq P_{cc}^t \leq r_{max} P_{load}^t \quad (11)$$

式中:  $r_{min}$ 、 $r_{max}$  为微电网与电网交互功率的上下限比例。

(3) 供能设备输出功率约束:

$$0 \leq P_i^t \leq P_i^{max} \quad (12)$$

式中:  $P_i^t$  为供能设备在  $t$  时刻的输出功率;  $P_i^{max}$  为供能设备输出功率的上限。

(4) 铅酸蓄电池运行约束:

$$SOC_{BA}^{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{BA}^{max} \quad (13)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{BA, ch}^t \leq \varepsilon_{BA, ch} C_{BA} \\ 0 \leq P_{BA, dis}^t \leq \varepsilon_{BA, dis} C_{BA} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $SOC_{BA}^{\max}$ 、 $SOC_{BA}^{\min}$  分别为铅酸蓄电池的最大最小荷电状态； $\varepsilon_{BA, ch}$ 、 $\varepsilon_{BA, dis}$  分别为蓄电池的最大充放电率； $C_{BA}$  为铅酸蓄电池的额定容量。

(5) 蓄热罐运行约束：

$$SOTST^{\min} \leq SOTST(t) \leq SOTST^{\max} \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{TST, ch}^t \leq \varepsilon_{TST, ch} C_{TST} \\ 0 \leq Q_{TST, dis}^t \leq \varepsilon_{TST, dis} C_{TST} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $SOTST^{\max}$ 、 $SOTST^{\min}$  分别为蓄热罐的最大最小蓄能状态； $\varepsilon_{TST, dis}$ 、 $\varepsilon_{TST, ch}$  分别为蓄热罐的最大蓄放热效率； $C_{TST}$  为蓄热罐的额定容量。

(6) 可中断负荷中断容量约束：

$$0 \leq P_{IL, i} \leq P_{IL, i}^{\max} \quad (17)$$

式中： $P_{IL, i}^{\max}$  为可中断负荷的最大中断容量。

(7) 可中断负荷中断时间约束：

$$0 \leq T_{IL, i} \leq T_{IL, i}^{\max} \quad (18)$$

式中： $T_{IL, i}$ 、 $T_{IL, i}^{\max}$  分别为第  $i$  个可中断负荷用户的中断时间和最大中断时间。

(8) 可中断负荷中断次数约束：

$$0 \leq N_{IL, i} \leq N_{IL, i}^{\max} \quad (19)$$

式中： $N_{IL, i}$ 、 $N_{IL, i}^{\max}$  分别为第  $i$  个可中断用户的中断次数和最大中断次数。

## 2 并网运行策略

微网的运行策略将影响系统中机组各个时刻的出力状态和出力大小，进而影响微网的可靠性和经济性。

运行策略遵循的准则：

(1) 可再生能源优先调度

优先安排光伏阵列和风机处于最大功率点跟踪模式<sup>[7]</sup>，以最大限度消纳光电、风电。

(2) “以热定电”运行模式

CHP 机组优先满足热负荷，若受最大功率限制导致供热不足时，由蓄热罐补充，若仍不足，由燃气锅炉进行补充。CHP 机组满足热负荷后不再发电。系统中不足的电负荷由蓄电池补充，若

仍不足由电网供给。

(3) 可中断负荷调用机制

若所有供能设备在最大出力情况下仍无法满足电负荷要求，则可调用可中断负荷。

## 3 自适应混沌粒子群算法

粒子群优化算法是基于鸟群觅食行为所衍生出来的一种启发式搜索算法，优化迭代过程中粒子速度和位置的更新为

$$v_{i+1} = \omega v_i + c_1 \text{random}(0, 1)(p_{\text{best}_i} - x_i) + c_2 \text{random}(0, 1)(g_{\text{best}} - x_i) \quad (20)$$

$$x_{i+1} = x_i + \alpha v_{i+1} \quad (21)$$

式中： $v_i$ 、 $x_i$  为粒子的当前速度和位置； $v_{i+1}$ 、 $x_{i+1}$  为粒子迭代一次后的速度和位置； $p_{\text{best}_i}$  为第  $i$  个粒子的历史最优解； $g_{\text{best}}$  为种群全局最优解； $\omega$  为粒子更新的惯性权重； $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子； $\alpha$  为约束因子。

针对该算法易陷入局部最优的问题，本文提出混沌搜索策略和自适应惯性权重策略对传统粒子群算法进行改进。

### 3.1 混沌搜索策略

混沌搜索是以混沌变量的形式进行搜索，提升后期搜索效率。利用混沌映射产生混沌序列，常用混沌映射函数有：Logistic, Chebyshev, Tent。其中 Tent 映射混沌序列分布均匀，寻优速度较快且搜索效率较高。本文采用 Tent 映射来产生混沌向量。

$$z_{i+1} = \begin{cases} z_i/0.7, & z_i \in (0, 0.7] \\ 10/3z_i(1-z_i), & z_i \in (0.7, 1) \end{cases} \quad (22)$$

### 3.2 自适应惯性权重策略

传统 PSO 算法中，惯性权重一般线性递减，与粒子适应度值不匹配，降低了算法的寻优性能。惯性权重较大时，有利于全局搜索；取值较小时，有利于局部搜索。本文采用基于各粒子适应度值大小自动适应调节的惯性权重，增强混沌粒子群算法在全局搜索与局部搜索之间的协调性。自适应惯性权重的更新：

$$\omega = \begin{cases} \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(f_i - f_{\min})}{f_{\text{ave}} - f_{\min}} + \omega_{\min}, & f_i < f_{\text{ave}} \\ \omega_{\max}, & f_i > f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $\omega_{\min}$ ,  $\omega_{\max}$  分别为惯性权重的最小值和最大值;  $f_i$  为粒子  $i$  的适应度值;  $f_{\min}$ ,  $f_{\text{ave}}$  分别为种群适应度的最小值和平均值。

### 3.3 自适应混沌粒子群算法求解流程

结合上述 2 种优化策略, 结合实际的含可中断负荷的园区微网经济优化调度问题, 自适应混沌粒子群 (adaptive chaos particle swarm optimization, ACPSO) 算法步骤如下:

step 1: 输入各微源运行参数和负荷相关数据, 风机、光伏预测输出功率, 电网分时电价、天然气价格, 以及相关费用系数。

step 2: ACPSO 参数初始化。设定算法种群规模、最大迭代次数、学习因子、决策变量搜索空间上下限。

step 3: 种群初始化。根据各微源的约束条件, 随机初始化粒子种群。

step 4: 判断不等式约束是否满足, 若决策变量超过取值范围的最大值, 则令其等于最大值; 若小于最小值, 则令其等于最小值。

step 5: 计算目标函数值。

step 6: 更新个体最优解和全局最优解: 比较当前粒子的适应度值  $f_i$  和个体极值  $f_{pi}$ , 如果  $f_i > f_{pi}$ , 则将  $f_i$  赋给  $f_{pi}$ ,  $x_i$  赋给  $p_{best_i}$ , 否则,  $p_{best_i}$ ,  $f_{pi}$  不变; 比较当前粒子的目标函数值  $f_i$  和全局极值  $f_g$ , 如果  $f_i > f_g$ , 则将  $f_i$  赋给  $f_g$ ,  $x_i$  赋给  $g_{best}$ , 否则,  $g_{best}$ ,  $f_g$  不变。

step 7: 按照式(15), (16), (18)更新产生新一代粒子。

step 8: 对全局最优解的每一维进行混沌优化: 将  $g_{best_k} (k=1, 2, \dots, D)$  按照式(19)映射到 Tent 方程的定义域  $[0, 1]$  上:

$$z_k = (g_{best_k} - X_{\min, k}) / (X_{\max, k} - X_{\min, k}) \quad (24)$$

进而用 Tent 方程按式(17)迭代产生  $M$  个混沌序列  $z'_k (t=1, 2, \dots, M)$ , 将混沌序列  $z'_k$  通过式(20)逆映

射返回到原解空间。

$$x'_k = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) z'_k$$

step 9: 对每个  $x'_k$  在原空间计算适应度值, 若优于  $g_{best}$ , 则更新  $g_{best}$ 。

step 10: 判断迭代次数是否小于最大迭代次数, 若是则返回 step 6, 重复 step 6~9。

step 11: 输出目标函数的全局最优解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例数据

本文算例采用文献[8]中的大型园区综合能源微网, 调度周期为 24 h, 时间间隔为 1 h。该微网内配置有一台 JMS 416 GS-N.L 燃气发电机组, 额定发电功率为 1 210 kW; 一台燃气锅炉, 制热功率为 5 500 kW; 园区内光伏阵列构成小型光伏发电系统, 总容量 507 kW; 风力发电机组构成小型风力发电系统, 总容量 350 kW; 铅酸蓄电池组构成电储能系统, 总容量 650 kWh; 蓄热罐构成热储能系统, 总容量 1 500 kWh。供能设备的相关参数如表 1~2 所示。天然气价格按当地能源价格取为 2.37 元/m<sup>3</sup>。园区微网与大电网的交互电价采用分时电价如表 3 所示, 电力售价取购价的 70%。以系统运行总成本  $f = f_{\text{inv}} + f_{\text{om}} + f_{\text{ng}} + f_{\text{cc}} + f_{\text{rl}}$  为目标函数, 利用 ACPSO 算法进行模型求解, 算法基本设置如下: 粒子群规模为 200, 最大迭代次数为 200, 学习因子  $c_1 = c_2 = 1.3$ ,  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $\omega_{\min} = 0.4$ , 约束因子  $\alpha = 1$ 。

表 1 供能设备成本参数  
Table 1 Energy supply equipment cost parameters

供能设备	$k_{\text{inv}} /$ (元/kW)	$k_{\text{om}} /$ (元/kW)	$P_{\text{max}} /$ kW	$P_{\text{min}} /$ kW	year/a
WT	6 000	0.040 0	350	0	25
PV	7 000	0.030 0	507	0	20
CHP	6 000	0.040 1	1 228	242	20
GB	800	0.002 0	5 500	0	20
BA	600	0.001 0	650	0	10
TST	300	0.002 0	1500	0	10

表2 供能设备技术参数

Table 2 Technical parameters of energy supply equipment

供能设备	参数	数值
CHP	$\alpha$	2.30
	$\eta_{\text{CHP}}$	0.30
GB	$\eta_{\text{GB}}$	0.90
BA	$\epsilon_{\text{BA}}^{\text{ch}}$	0.85
	$\epsilon_{\text{BA}}^{\text{dis}}$	0.90
	$\text{SOC}_{\text{BA}}^{\text{min}}$	0.10
	$\text{SOC}_{\text{BA}}^{\text{max}}$	0.90
TST	$\epsilon_{\text{TST}}^{\text{ch}}$	0.85
	$\epsilon_{\text{TST}}^{\text{dis}}$	0.90
	$\text{SOC}_{\text{TST}}^{\text{min}}$	0.10
	$\text{SOC}_{\text{TST}}^{\text{max}}$	0.90

表3 能源价格信息

Table 3 Energy price information

时段	购价/(元/kWh)	
峰	08:00—11:00	1.31
	18:00—23:00	
平	07:00—08:00	0.86
	11:00—18:00	
谷	23:00—07:00	0.44

以1月份某日作为冬季典型日，园区冬季典型日的电负荷、热负荷如图2所示。根据冬季典型日内的风速、风向、日照强度，以及气温温度数据对风机、光伏阵列的发电功率进行预测，其预测输出功率曲线如图3所示。

假设该园区有10组用户愿意参与到可中断负荷项目中，参考文献[9-10]列出这些用户的报价方案，如表4所示。

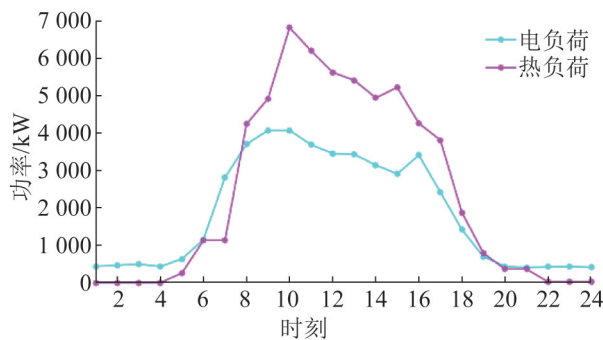


图2 冬季典型日热电负荷曲线

Fig. 2 Typical daily thermal power load curve in winter

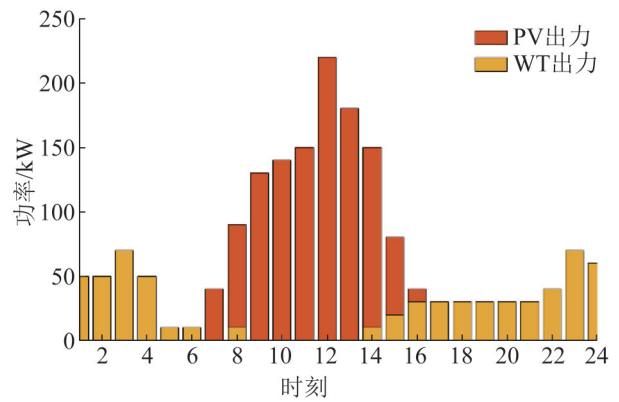


图3 风机、光伏联合预测出力曲线

Fig. 3 Wind turbine and photovoltaic joint forecast output curve

表4 可中断负荷用户报价方案

Table 4 Interruptible load user quotation scheme

用户	$T_{\text{IL},i}^{\text{max}}/\text{h}$	$P_{\text{IL},i}^{\text{max}}/\text{kW}$	$N_{\text{IL}}^{\text{max}}/\text{次}$	$\beta_{\text{IL},i}/(\text{元}/\text{kWh})$	$\gamma_{\text{IL},i}/(\text{元}/\text{kWh})$
1	2	520	2	0.05	0.96
2	2	400	2	0.05	0.94
3	2	660	3	0.04	1.21
4	2	430	2	0.04	0.75
5	2	380	2	0.05	0.70
6	2	280	2	0.03	1.40
7	1	320	1	0.04	1.12
8	1	510	1	0.08	1.18
9	1	260	1	0.04	0.50
10	1	460	3	0.03	0.95

为验证可中断负荷对园区微网优化调度的影响，设定2种场景作为本文的验证场景：

场景1：不考虑调用可中断负荷，并网运行策略下园区微网以运行成本最小目标为优化调度。

场景2：考虑调用可中断负荷，并网运行策略下园区微网以运行成本最小目标为优化调度。

## 4.2 算例优化结果

场景1：不考虑可中断负荷时供能设备出力情况如图4~5所示。

图4中，风电和光伏运行成本较低，因此优先进行发电。在时段01:00—06:00时，电价较低，负荷较低，系统向大电网购电满足负荷需求。蓄电池在谷



时段01:00—04:00, 20:00—21:00, 23:00—24:00进行充电, 在峰时段08:00—14:00、17:00进行放电, 使得从电网处购得的功率降低, 保证了系统运行的经济性, 有助于削峰填谷。图5中, 由于冬季热负荷较大, CHP机组首先满足热负荷。在时段01:00—04:00和20:00—24:00, 热负荷为0, CHP机组保持在最小出力, 蓄热罐储存系统中多余的热功率。在热负荷高峰时段10:00—15:00, CHP机组维持在最大出力, 蓄热罐释放热能供热, 燃气锅炉补充供热。

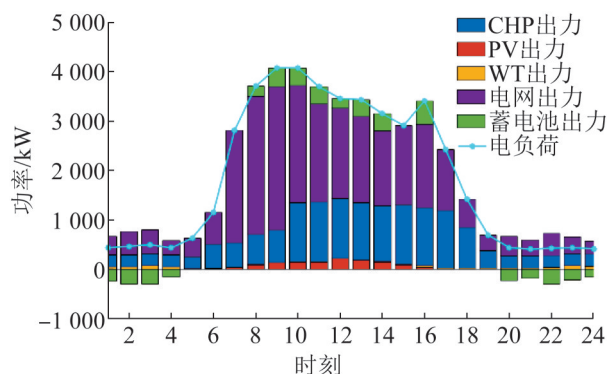


图4 不考虑可中断负荷时供电设备出力  
Fig. 4 Power supply equipment output without considering IL

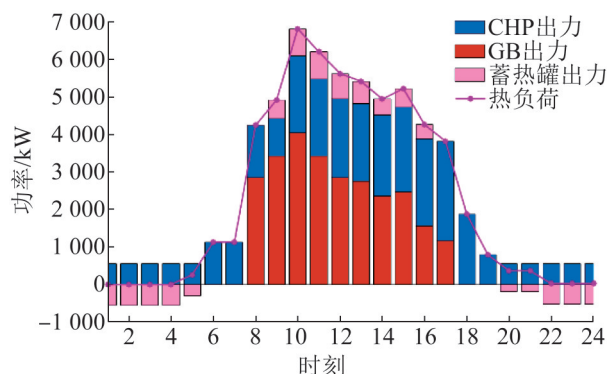


图5 不考虑可中断负荷时供热设备出力  
Fig. 5 Heating equipment output without considering IL

场景2: 考虑可中断负荷时供能设备出力情况如图6~7所示。

计及可中断负荷后, 对比削减前后的电负荷曲线发现可中断负荷在电负荷高峰时段09:00—17:00响应。用户在尖峰时刻中断部分用电, 整体上平缓了负荷曲线, 改善了负荷曲线的形状; 电网交

互功率曲线相较于场景一有所降低, 降低了微网的购电成本; 同时蓄电池的充放电深度相较于场景一有所降低, 这是因为峰时段电负荷降低, 蓄电池不用以最大功率运行, 有利于延长蓄电池的使用寿命。得到了参与可中断负荷项目的用户最优调用计划, 表5列出参与调用计划的用户的中断容量、中断次数和中断时段。

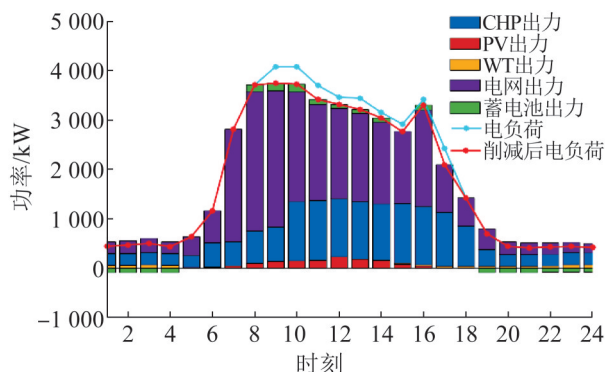


图6 考虑可中断负荷时供电设备出力  
Fig. 6 Power supply equipment output considering IL

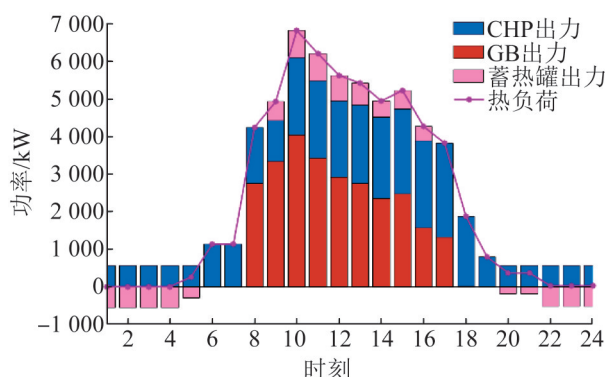


图7 考虑可中断负荷时供热设备出力  
Fig. 7 Heating equipment output considering IL

表5 可中断负荷调用结果  
Table 5 Interruptible load call result

用户编号	中断容量/kW	中断次数(次)	中断时段
1	520	2	09:00—10:00
			12:00—13:00
3	660	2	10:00—11:00
			14:00—15:00
5	380	2	09:00—10:00
			16:00—17:00
8	510	1	10:00

由表5可以看出,参与调用计划的用户中断次数和中断容量都达到上限,负荷中断的时间集中在系统峰荷时段,可以有效削减高峰时期的电负荷。说明对于柔性负荷,即那些对于供电可靠性要求较低的工业商业负荷,制定合理的补偿费用可以有效提高他们参与需求侧管理项目的积极性。

采取负荷率、日最小负荷率、峰谷差3种负荷特性指标作为系统调峰性能评价指标:

(1) 负荷率(load rate, LR)

$$LR = \frac{P_{load}^{ave}}{P_{load}^{max}} \times 100\% \quad (25)$$

式中:  $P_{load}^{max}$ 、 $P_{load}^{ave}$  分别为该园区微网调度周期内的最大负荷和平均负荷。

(2) 日最小负荷率(minimum daily load rate, MDLR)

$$MDLR = \frac{P_{load}^{min}}{P_{load}^{max}} \times 100\% \quad (26)$$

(3) 峰谷差(valley-to-peak, VTP)

$$VTP = P_{load}^{max} - P_{load}^{min} \quad (27)$$

式中:  $P_{load}^{min}$  为该园区微网调度周期内的最小负荷。

在调度周期内2种场景下的目标函数值、各项成本及系统调峰性能评价指标如表6所示。

表6 两种场景优化结果  
Tab.6 Two scene optimization results

场景	子费用(元)					综合费用(元)	LR/%	MDLR/%	VTP/kW
	$f_{inv}$	$f_{om}$	$f_{ng}$	$f_{cc}$	$f_{IL}$				
一	3.35	1 294	20 367	33 400	-	55 064.35	46	10.17	3 670.2
二	3.35	1 276	19 860	30 020	2166	2 166	45.85	11.12	3 293.2

与场景1相比,实施可中断负荷项目后,场景2的综合费用下降了3.08%,系统运行维护费用和天然气费用略有波动,购电费用减少了10.11%。购电费用的大幅下降降低了园区微网在波动的平衡电力市场购电的风险,降低了联络线上的功率波动。场景2相较于场景一每天可以节约总费用1 689元,每年可以节约61万元,说明IL项目给园区微网带来了较好的经济效益。

IL调用后,园区微网的负荷峰谷差降低了10%,表明IL项目的应用可有效提高该园区微网的调峰能力。场景2相较于场景1负荷率有所降低,最小负荷率有所提高,表明IL项目的应用有利于园区微网平滑电负荷曲线,减小系统调峰需求容量。

以运行总成本为目标函数进行优化的迭代过程,如图9所示。

在场景2的基础上,分别采用传统粒子群算法和自适应混沌粒子群算法进行仿真。仿真结果表明,自适应混沌粒子群算法增大了粒子的搜索能力,在收敛速度和收敛精度上都优于传统粒子群算法。

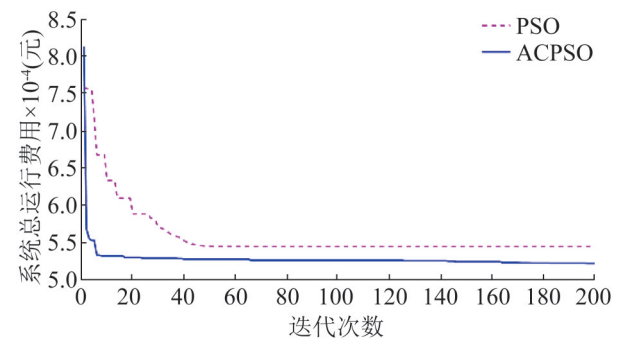


图9 系统总费用优化迭代过程

Fig. 9 Total system cost optimization iterative process

## 5 结论

本文建立了计及可中断负荷的园区微网综合能源系统模型,结合北方某大型园区数据,以系统运行总成本为目标,运用自适应混沌粒子群算法,分为是否计及可中断负荷2种情景,结合分时电价,优化系统中供能设备出力。算例结果表明,计及可中断负荷的园区微网运行总费用有所降低,电负荷曲线峰值降低。说明可中断负荷项目的应用能有效提高系统的调峰能力,为园区微网的热、电生产提供优化空间。

## 参考文献:

- [1] 王德志. 电力市场下需求响应参与辅助调峰调频的建模与优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
Wang Dezhi. Research on Modeling and Optimization of Ancillary Peak-Shaving and Ancillary Frequency Regulation with Demand Response in Electricity Market [D]. Guanzhou: South China University of Technology, 2019.
- [2] 刘超然. 电动汽车辅助调峰策略与优化调度[D]. 太原: 山西大学, 2019.  
Liu Chaoran. Electric Vehicle Auxiliary Peaking Strategy and Optimal Scheduling[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [3] 杨辰星. 公共楼宇空调负荷参与电网调峰关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
Yang Chenxing. Research on Key Technologies for Peak Load Shaving by Public Buildings' Air Conditioning Loads[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [4] 方杰. 考虑可中断负荷的机组组合优化建模及其应用研究[D]. 石家庄: 华北电力大学, 2014.  
Fang Jie. Application Study on Unit Commitment Optimization Modeling Based on Interruptible Load[D]. Shijiazhuang: North China Electric Power University, 2014.
- [5] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2708-2714.  
Sun Yujun, Li Yang, Wang Beibei, et al. A Day-Ahead Scheduling Model Considering Demand Response and Its Uncertainty[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2708-2714.
- [6] 韩宇, 马立新, 唐继旭, 等. 基于改进AGA的微电网优化管理研究[J]. 软件导刊, 2019, 18(12): 151-154.  
Han Yu, Ma Lixin, Tang Jixu, et al. Research on Microgrid with Electric Vehicle Optimization Management Based on Improved AGA[J]. Software Guide, 2019, 18(12): 151-154.
- [7] 汤浩, 马立新. 基于空间距离的双种群粒子动态优化微网配置[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(7): 35-40.  
Tang Hao, Ma Lixin. Dynamic Optimization of Microgrid Configuration Based on Spatial Distance with Dual Population Particles[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(7): 35-40.
- [8] 陈鸿亮. 面向大型园区供能的冷热电联供型微网优化调度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
Chen Hongliang. Research on the Optimal Scheduling of CCHP Microgrid Oriented to Large Industrial Park[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.
- [9] 马肖一. 计及可中断负荷和风电接入的随机经济调度方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Ma Xiaoyi. Research on Power System Stochastic Economic Dispatch Considering Interruptible Load and Wind Power [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [10] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场可中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 11-16.  
Wang Jianxue, Wang Xifan, Wang Xiuli. Study on Model of Interruptible Load Contract in Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 11-16.