

# Research on Operation Optimization of Integrated Energy System for Park Considering Integrated Demand Response

Xuejun Shang<sup>1</sup>, Xianxu Huo<sup>1</sup>, Yan Qi<sup>1</sup>, Yi Ding<sup>1</sup>, Lei Wu<sup>1</sup>, Yurui Xu<sup>2</sup>, Wenbiao Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tianjin Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin

<sup>2</sup>Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin

Email: xuejun.shang@tj.sgcc.com.cn

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 24<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Integrated energy system for park can realize the complementation and cascade utilization of different energy sources in the park, improve the efficiency of utilizing energy, and reasonably integrate advantages of various subjects. On the other hand, with the development of smart grid, the potential for demand-side flexible resources to participate in regulation has been constantly explored. This paper mainly studies the optimal operation regulation of integrated energy system for park when considering the integrated demand response. Firstly, the framework of IESP is constructed, three economic entities including energy suppliers, operators and users are determined, and the method called Stackelberg game is given. Secondly, the flexible model for users is constructed and the energy flow coupling equipment owned by operators is modeled. On this basis, the optimization and regulation strategy of park operation considering demand response is developed and the case is analyzed. The simulation results show that the park benefits more and promotes the consumption of renewable energy.

## Keywords

Integrated Energy System for Park, Demand Response, Stackelberg Game, Operation Optimization

# 考虑负荷需求响应的园区综合能源系统运行优化研究

尚学军<sup>1</sup>, 霍现旭<sup>1</sup>, 戚艳<sup>1</sup>, 丁一<sup>1</sup>, 吴磊<sup>1</sup>, 许煜蕊<sup>2</sup>, 陆文标<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津

<sup>2</sup>智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津

文章引用: 尚学军, 霍现旭, 戚艳, 丁一, 吴磊, 许煜蕊, 陆文标. 考虑负荷需求响应的园区综合能源系统运行优化研究[J]. 电力与能源进展, 2020, 8(3): 57-69. DOI: 10.12677/aepe.2020.83007

## 摘要

园区综合能源系统能够实现园区不同能源之间的互补和梯级利用,提高能源综合利用效率,合理汇集多方主体的资源优势。另一方面,需求侧灵活性资源参与调控的潜力随着智能用电技术的发展得到了不断挖掘。本文主要研究园区综合能源系统在考虑负荷需求响应时的运行优化调控。首先,构建园区综合能源系统的整体框架,确定了能源供应商、园区运营商、园区用户3个经济实体,以及主从博弈的分析方法;其次,构建园区用户的柔性响应模型,并对园区运营商拥有的能流耦合设备进行建模;在此基础上,制定考虑负荷需求响应的园区综合能源系统运行优化策略,并进行案例分析;最后,算例仿真结果表明,本文所提策略可以提高园区运行经济性。

## 关键词

园区综合能源系统, 需求响应, 主从博弈, 运行优化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)打破原有各个能源系统独立运行的方式,对电、气、热等多种能源系统进行统一规划、协调运行,实现多种能源之间的优势互补和梯级利用,有效提高了能源综合利用效率和 RES 消纳能力,减少了污染排放[1]。园区综合能源系统(Integrated Energy System for Park, IESP)立足于园区的典型场景,服务更具有针对性和专一性,资产归属相对统一,开展综合能源利用不受政策羁绊。IESP 中有多种能源供应和多种负荷需求,能够合理汇集不同主体的资金、资源优势,协调各方主体的利益[2] [3] [4]。另一方面随着智能用电技术的快速发展以及竞争市场的完善,需求侧与供能侧将能够进行双向互动。随着园区规模的不断扩大,园区内各种负荷高峰会对园区产生不小的供能压力,利用需求响应(Demand Response, DR)技术能够有效地削减各种负荷高峰[5]。园区运营商中有众多能流耦合设备,各个设备的能源转换方式有较大差异,当用户改变某种能源的需求时,将会影响到其他能源的供求关系。基于此,用户可对不同能源需求进行调整,缓解用能紧张,提高能源利用率[4],实现园区用户的综合需求响应(Integrated Demand Response, IDR)。

目前,已有许多学者就 DR 在电力系统中的应用做了相关研究。文献[5]兼顾系统的配置经济性和运行经济性,考虑电/热负荷需求响应和供需双侧热/电耦合,建立柔性电负荷模型、柔性热负荷模型,综合考虑微网年等值配置成本和四季典型月的运行收益,建立微网能源优化规划数学模型。利用禁忌搜索算法求解得微网能源分层嵌套一体规划方案。该方法将需求响应融入到微网中,但是其只建立了电/热两种能源形式,对于多能源形式的综合能源系统要求还相差很远,另外在计及负荷侧用户类型差异性方面仍需改进。文献[6]阐述了 IESP 自身的特性与优势,即园区内可调度负荷占比较大、信息网络结构完善、自动化水平高、响应速度快。该文章还构建了 IESP 的典型调度运行架构,本文在此架构基础上进行了改

进,将传统的电负荷改进为冷、热、电多种形式的综合负荷,用能设备也增加了 CCHP 等能流耦合设备,从而进一步挖掘园区综合能源系统的经济优势。文献[7]改善了文献[5] [6]中负荷类型单一的缺点,将用户对于冷、热、电多能流的需求纳入需求响应范围内,提出基于多能互补的电、冷、热综合需求响应机制,但文中所提的综合需求响应仅为能流耦合设备实现的不同能源系统的互补利用,这种广义上的综合需求响应,并未考虑终端能源用户为实现自身利益最优,响应冷热电价格变化,调整自身用能方式的行为,缺少运营商和用户之间的互动。文献[8]用主从博弈模型来描述园区运营商和园区用户之间的经济行为,实现了运营商和用户双方互动优化。但是该文章并未深入分析由主从博弈引起的削峰填谷效果的实际意义,也并未考虑能流耦合设备的工作状态。

本文在参考借鉴上述文献优势的基础上,首先,构建了 IESP 的整体框架,并对园区运营商和园区用户的利益关系进行详细分析:在园区运营商制定能源售价,考虑自身的收益的同时,还要计及园区用户的需求响应行为,即双方存有利益的博弈,本文对此经济行为分析后,采用主从博弈的整体分析方法。其次,根据 IESP 中用户对冷、热、电价的响应程度等基本特征,构建园区用户的柔性响应模型,并对园区运营商拥有的能流耦合设备进行建模。在此基础上,分析综合需求响应对 IESP 运行的影响,即电、气、热不同形式能源的供能情况,与能流耦合设备的出力情况。重点关注 IESP 运行经济性指标,制定了考虑 IDR 的 IESP 运行优化调控策略[9]。

## 2. 园区综合能源系统建模

### 2.1. IESP 框架

随着综合能源系统建设的不断推进,以及用户侧智能设备的不断普及,加之能源市场逐步开放的政策,用户侧参与综合能源系统的运行调度成为可能。因此,能源系统调度运行的参与主体从供能侧一方变为供能侧和用户侧两方共同参与,显然两方拥有各自的利益层次,供能侧以保障系统稳定运行为首要任务,兼顾调度经济性;用户侧则希望通过参与系统调度降低自身购能成本。

为清晰直接的描述上述关系,本文首先从市场层面构建 IESP 的框架结构,如图 1。

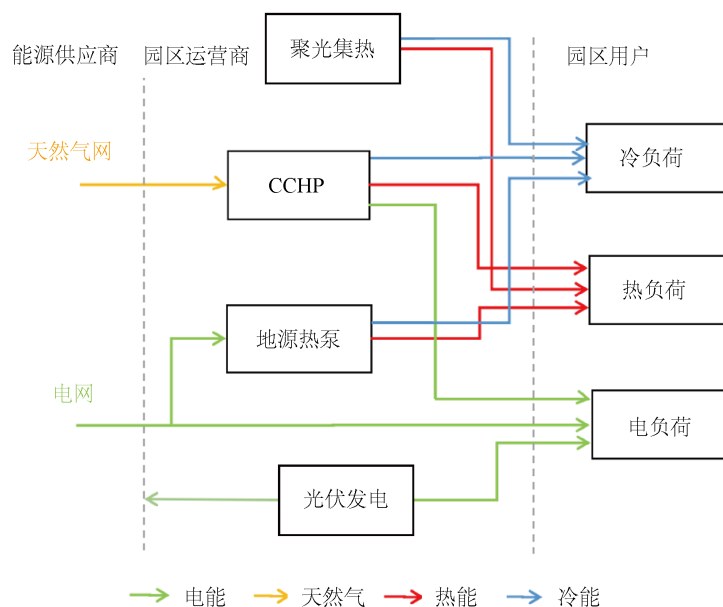


Figure 1. Framework of IESP  
图 1. IESP 的框架

在市场层面上 IESP 包含 3 个经济实体:

1) 能源供应商: 外部能源市场中电能、天然气的购买者。

2) 园区运营商: 整个园区的拥有者、运营者。其能够从上游能源供应商购买电、天然气能源, 并向下游园区用户售卖电能、热能、冷能。可以运行调控园区内的光伏发电系统、太阳能聚光发热系统, 以及所有能流耦合设备, 包括 CCHP 机组、地源热泵系统, 实现不同能源形式之间的转化, 为用户提供多种能源需求。通过上述能量管理实现供给侧和需求侧的协同优化, 提高各种能源的利用效率, 促进光能就地消纳, 并且能够获取差价利润[10] [11]。

3) 园区用户: 其需求类型包括电、热、冷负荷需求, 分为可控负荷和不可控负荷。

图 1 为 IESP 框架。上述 3 个经济实体之间能够保证相互共享可靠的实时价格、需求、供应信息, 这为园区运营商正确、高效的管理园区能源提供了基础。

## 2.2. 园区用户

园区用户的冷热电负荷通常可以分为以下两类: 1) 不可转移到其他时间段的负荷, 即刚性负荷(例如照明、夜晚的热水供应、夏季正午制冷); 2) 可以转移到其他时间段的负荷, 即可转移负荷(例如电动汽车、夏季非正午时段的冷需求)。负荷的 DR 可分为价格型和激励型, 由于激励型 DR 主要以相关政策为激励, 机制不明晰, 因此本文只考虑价格型 IDR。价格型的 IDR 下, 园区运营商通过在用能低谷时段适当降低能源价格, 用能高峰时段适当抬高能源价格, 来引导理性用户采取合理的用能方式(降低自身购能成本), 达到削峰填谷的效果。

### 2.2.1. 园区用户模型构建

园区夏季和冬季的冷、热负荷有较大的变化, 但这对系统的运行调度不会产生根本性影响, 为便于分析, 本文将主要分析园区综合能源系统的夏季运行情况。在借鉴已有相关课题的论文使用的数据基础上, 本文假设在夏季某典型日的任意时段内, 价格型电、热、冷负荷分别占该时段原始负荷的 20%、20%、20%。上述关系可由下式表示。

$$P_t^{\text{summerEf}} = 20\% \times P_t^{\text{summerE}} \quad (1)$$

$$P_t^{\text{summerHf}} = 20\% \times P_t^{\text{summerH}} \quad (2)$$

$$P_t^{\text{summerCf}} = 20\% \times P_t^{\text{summerC}} \quad (3)$$

其中,  $P_t^{\text{summerX}}$  为原始夏季负荷,  $P_t^{\text{summerXf}}$  为价格型可转移负荷, X 可取 E、H、C, 分别代表电、热、冷。

园区用户的可控负荷的平移能够起到削峰填谷的作用。为了最小化用户的用能舒适度的损失, 在一个典型日内其某种能源形式的可控负荷的平移量代数和应为零, 或在一个典型日内其某种能源形式的总量并不改变。即将  $t$  时段的可控负荷等量转移到其他时段, 依然满足用户用能需求。将由其他时段移动到  $t$  时段的可控负荷设为正值, 由  $t$  时段移动到其他时段的可控负荷设为负值。上述关系可由下式表示。

$$\sum_{t=1}^{24} P_t^{\text{summerX}} = \sum_{t=1}^{24} P_t^{\text{summerXDR}} \quad (4)$$

$P_t^{\text{summerXDR}}$  是综合需求响应后的用户负荷。

### 2.2.2. 园区用户目标函数

园区用户的目标函数  $U$  可以表示为

$$\min U = \sum_{t=1}^{24} c_t^e P_t^{\text{summerEDR}} \Delta t + c_t^h P_t^{\text{summerHDR}} \Delta t + c_t^c P_t^{\text{summerCDR}} \Delta t \quad (5)$$

其中,  $c_t^c$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^e$  分别为当前园区用户接收到的, 由园区运营商制定的冷、热、电价,  $U$  为当前园区用

户的总购能成本。 $c_t^c$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^e$ 对于园区用户层来说是固定不变的,因此该层规划是线性规划问题。

## 2.3. 园区运营商模型

### 2.3.1. 能流耦合设备模型

园区中包含光伏发电系统、CCHP机组、地源热泵系统、太阳能聚光发热系统(含热水型吸收式制冷机)。现分别对上述能流耦合设备进行建模。

通常情况下,这些能流耦合设备的能量转换效率会随其工况的改变而改变,但其效率变化波动较小。同时考虑到缺少相关详细数据,要精确的描述能量转换效率随运行工况的变化是比较困难的。因此本文将各个能流耦合设备的能量转换效率设为定值。

各个能流耦合设备的模型为

$$P_t^{\text{CCHPX}} = \eta_{\text{CCHPg2X}} \times P_t^{\text{CCHPg2X}} \quad (6)$$

$$P_t^{\text{CCHPg}} = P_t^{\text{CCHPg2E}} + P_t^{\text{CCHPg2H}} + P_t^{\text{CCHPg2C}} \quad (7)$$

$$P_t^{\text{S}} = P_t^{\text{CCHPg}} \quad (8)$$

$$P_t^{\text{GHPX}} = \eta_{\text{GHPe2X}} \times P_t^{\text{GHPe2X}} \quad (9)$$

$$P_t^{\text{GHPe}} = P_t^{\text{GHPe2C}} + P_t^{\text{GHPe2H}} \quad (10)$$

$$P_t^{\text{e}} = P_t^{\text{GHPe}} + P_t^{\text{eLD}} \quad (11)$$

$$P_t^{\text{SUNe}} = \eta_{\text{SUNe}} P_t^{\text{SUN1}} \quad (12)$$

$$P_t^{\text{SUNh}} = \eta_{\text{SUNh}} P_t^{\text{SUN2h}} \quad (13)$$

$$P_t^{\text{SUNc}} = \eta_{\text{SUNc}} P_t^{\text{SUN2c}} \quad (14)$$

其中, $P_t^{\text{CCHPg2X}}$ 为CCHP中输入的用于供电、热、冷的天然气功率; $P_t^{\text{CCHPX}}$ 为CCHP中输出的电、热、冷功率; $P_t^{\text{CCHPg}}$ 为CCHP中输入的总天然气功率; $P_t^{\text{S}}$ 为园区运营商从能源供应商购进的总天然气功率; $P_t^{\text{GHPe2X}}$ 为地源热泵输入的用于供热、冷的电功率; $P_t^{\text{GHPX}}$ 为地源热泵输出的热、冷功率; $P_t^{\text{GHPe}}$ 为地源热泵输入的总电功率; $P_t^{\text{eLD}}$ 为直接用于用户用电需求的电功率; $P_t^{\text{e}}$ 为园区运营商从能源供应商购进的总电功率; $P_t^{\text{SUN1}}$ 为光伏板上接收到的光能; $P_t^{\text{SUNe}}$ 为光伏发电量; $P_t^{\text{SUN2h}}$ 、 $P_t^{\text{SUN2c}}$ 为聚光集热系统接收到的用于制热、制冷的光能; $P_t^{\text{SUNh}}$ 、 $P_t^{\text{SUNc}}$ 为聚光集热系统的制热、制冷量; $\eta_{\text{CCHPg2X}}$ 分别为CCHP额定气转热、气转电、气转冷效率; $\eta_{\text{GHPe2X}}$ 为地源热泵额定电制热、电制冷效率; $\eta_{\text{SUNe}}$ 为光伏发电的电效率; $\eta_{\text{SUNh}}$ 为聚光集热的热效率; $\eta_{\text{SUNc}}$ 为聚光集热的冷效率。

能源耦合设备中不等式约束为

$$P_t^{\text{CCHPX}} < P_{\text{max}}^{\text{CCHPX}} \quad (15)$$

$$P_t^{\text{GHPX}} < P_{\text{max}}^{\text{GHPX}} \quad (16)$$

$$P_t^{\text{e}} < P_{\text{max}}^{\text{e}} \quad (17)$$

$$P_t^{\text{S}} < P_{\text{max}}^{\text{S}} \quad (18)$$

其中, $P_{\text{max}}^{\text{CCHPX}}$ 为CCHP输出的电、热、冷功率最大值; $P_{\text{max}}^{\text{GHPX}}$ 为GHP输出的热、冷功率最大值; $P_{\text{max}}^{\text{e}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{S}}$ 为园区运营商从能源供应商购入电能、天然气功率的最大值。

### 2.3.2. 电热冷价制定

将该园区系统作为一个孤立系统，不考虑其他供能系统的单位制冷、制热的能耗费用。因电价的初始值及波动范围已经确定，通过和电价进行类比，可以得出冷价、热价的基准值，热、冷价格在基准值附近波动。CCHP 机组的额定发电功率、额定制热功率、额定制冷功率、气转电效率、气转热、气转冷效率已知。

有关电价的约束如下：

$$\sum_{t=1}^{24} c_t^e < \sum_{t=1}^{24} c_t^{em} \quad (19)$$

其中， $c_t^{em}$  由能源供应商制定的电价，该价格为能源供应商根据整个电力市场运行制定的价格。园区运营商制定的面向园区用户的电价，在一个典型日内的平均值，应该小于能源供应商制定的电价。否则，园区用户出于电价利润的考虑，将选择直接从上层电网购电[12]。

热价基准值的计算公式如下：

$$c_t^{hm} = c_t^e \times \frac{p^{CCHPeN}}{p^{CCHPhN}} \quad (20)$$

冷价基准值的计算公式如下：

$$c_t^{cm} = c_t^e \times \frac{p^{CCHPeN}}{p^{CCHPeN}} \quad (21)$$

该定价方案，在系统配置确定的情况下，就能够通过电价计算出冷、热价的基准值，方法较为简便，通用性较高，缺点是计算出来的经济效益并不能反映真实的市场情况。但本文重点关注负荷需求响应，即用户对冷、热、电价的响应能力，与具体的价格关系不大。

### 2.3.3. 园区运营商目标函数

园区用户的目标函数  $O$  可以表示为

$$\begin{aligned} \max O = & \sum_{t=1}^{24} (c_t^e P_t^{\text{summerE}} \Delta t + c_t^h P_t^{\text{summerH}} \Delta t + c_t^c P_t^{\text{summerC}} \Delta t) \\ & - (c_t^{S1} P_t^{\text{SUN1}} \Delta t + c_t^{S2} P_t^{\text{SUN2}} \Delta t) - (c_t^{em} P_t^e \Delta t + c_t^{gm} P_t^g \Delta t) \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $c_t^{S1}$ 、 $c_t^{S2}$  分别为可再生能源所需要的设备运行维护费用。其中， $O$  为当前园区运营商的总利润，即向园区用户售能赚取的利润与从能源供应商购能的成本、可再生能源设备运行维护费用之差。因为其中含有功率与价格两类变量的乘积，所以该层优化为非线性约束规划。

## 2.4. Stackelberg 博弈模型

### 2.4.1. 博弈的概念

博弈即互动决策。博弈有 3 个主要要素：决策者、对抗者、策略。决策者：在博弈中率先做出决策的一方为决策者。其一般根据自身的情况、状态优先采取一种具有方向性的行动。对抗者：在博弈中做出的决策与决策者基本反面，并且其行动时滞后于决策者，是被动的。以两决策者为例，其主要思想是博弈双方在制定各自策略时，要考虑到对方可能的策略，以保证在对方策略下实现自身的目标最大化。

在本文模型中，园区运营商和园区用户是相互独立的利益主体。园区运营商通过从能源供应商购能，确定能流耦合设备的输入、输出功率，制定面向用户的能源售价，实现园区拥有者的利益最大化。园区用户根据园区运营商制定的能源价格，调整自身的负荷曲线，实现用户自身的购能成本最小化。因此，在园区运营商制定能源售价，考虑自身的收益的同时，还要计及园区用户的需求响应行为。即园区运营

商和园区用户之间存有利益的博弈。

### 2.4.2. 主从博弈

本文的博弈双方为园区运营商和园区用户。运营商作为园区拥有者、管理者，有优先决定权，因此其为决策者，园区用户为对抗者。由于运营商和用户在做出策略时有先后顺序，即园区运营商制定面向用户的能源售价后，用户据此调整自身的用能策略；同时能够共享双方的信息，即运营商能准确获得用户负荷曲线，用户能准确获得能源售价。因此该博弈属于完全信息动态博弈。主从博弈中涉及到的领导者和跟随者可以很好地描述这种参与需求响应主体的关系。据此，本文采用主从博弈(Stackelberg 博弈)方法进行分析。

在 IESP 的框架下，主从博弈的具体实现流程为：园区运营商制定面向用户的售电、售热、售冷价格  $c_t^e$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^c$ ，并下发给用户；园区用户结合自身的生产、生活计划，依据接收到的电、热、冷价，以自身购能成本最小化为目标(式(5))，确定负荷曲线，并向运营商上报负荷曲线及各个时间段的可控负荷量  $P_t^{\text{summerXf}}$ ；运营商接收到用户反馈信息后，以自身净收益(售能与购能差值)最大化为目标，重新制定电、热、冷价  $c_t^e$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^c$ ，确定从电网、气网的购电量  $P_t^e$  和购气量  $P_t^g$ 。并将更新的价格再次下发给用户。用户继续对自身的购能成本寻优，再次与运营商互动。这个互动过程可能是一次也可能是有限的若干次，一直持续到双方达到博弈均衡(本文中的博弈均衡即为运营商和用户都不能通过单独改变自己策略来增加收益)。

### 2.5. 求解问题及流程

主从博弈的下层为园区用户，用户的目标函数  $U$  是其从园区运营商购电、冷、热的总成本，以最小化为目标，是线性优化问题。可以表示为式(5)。主从博弈的上层为园区运营商，其目标函数  $O$  代表当前园区运营商的总利润，即向园区用户售能赚取的利润与从能源供应商购能的成本、可再生能源设备运行维护费用之差，以最大化为目标，是非线性优化问题。可以表示为式(22)。对于下层园区用户，其约束条件包括式(1)至式(4)。对于上层园区运营商，其约束为式(6)至式(21)。

由于上层园区运营商的优化是非线性优化，所以本文 IESP 优化调控问题为非线性优化问题。采用遗传算法求解。

上层算法主要包括如下步骤：

**步骤 1:** 输入园区用户的夏季典型日的原始电、热、冷负荷数据  $P_t^{\text{summerX}}$ ，各个能流耦合设备的运行参数，园区运营商从能源供应商购电、购气价格。

**步骤 2:** 初始化种群  $p1$ 。包括园区运营商制定的面向用户的售电、热、冷价格，各个能流耦合设备的输入功率。

**步骤 3:** 园区运营商向园区用户下发电、热、冷价  $c_t^e$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^c$ 。

**步骤 4:** 调用下层算法，园区用户结合自身的生产、生活计划，依据接收到的电、热、冷价，以自身购能成本最小化为目标进行寻优，确定负荷曲线，并向运营商上报负荷曲线及各个时间段的可控负荷量  $P_t^{\text{summerXf}}$ 。园区运营商计算当前的收益  $A$ 。

**步骤 5:** 进行交叉、变异，形成新的种群  $p2$ 。

**步骤 6:** 重复步骤 4，园区运营商计算当前的收益  $B$ 。若  $B > A$ ，则令  $p1 = p2$ ， $A = B$ ，然后跳转至步骤 4；否则判断是否满足迭代结束要求，若满足，则博弈结束，否则跳转至步骤 5。

下层算法主要包括如下步骤：

**步骤 1:** 接收来自上层算法园区运营商下发的电、热、冷价  $c_t^e$ 、 $c_t^h$ 、 $c_t^c$ 。

**步骤 2:** 利用线性规划求解方法求解园区用户的效益, 确定电、热、冷负荷曲线, 并向运营商上报热、电、冷负荷曲线及各个时间段的可控负荷量  $P_t^{\text{summerXf}}$ 。

### 3. 算例验证

#### 3.1. 算例介绍

本文采用天津大学滨海工业研究院实际园区微网系统为案例, 来验证本文提出的园区运营商定价策略及系统内能源调控方法。该示范工程的设备组成及设备参数如表 1 所示。

**Table 1.** Parameters of related equipment

**表 1.** 相关设备参数

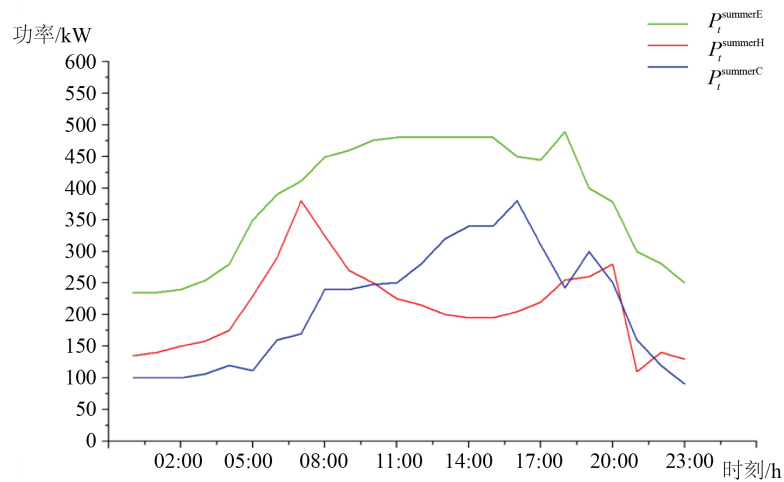
设备名称	发电功率	制热功率	制冷功率
CCHP 机组	120 kW	120 kW	150 kW
地源热泵系统	—	135 kW	115.3 kW
太阳能聚光发热系统(含热水型吸收式制冷机)	—	240 kW	130 kW
光伏发电系统	605.88 kWp	—	—

由于本文主要研究考虑负荷需求响应的园区综合能源系统运行优化调控, 从而忽略储能设备的作用。在园区用户负荷数据方面, 本文选取南方某现有园区的夏季典型日的实际负荷数据, 该园区的面积、用户构成与滨海工业研究院示范工程相似, 能够满足本文算例分析的需求。

#### 3.2. 算例分析

将该夏季典型日平均分为 24 个时间段, 每个时段的时长为 1 小时, 同时假设在各个时间段内系统的参数不发生改变, 这样某些变量在时刻  $t$  的取值即为该变量在时段  $t$  中的取值。

本文设置以下 2 个夏季园区场景进行系统仿真和对比分析。场景 1: 将园区用户电、热、冷负荷需求视为刚性。场景 2: 考虑园区用户电、热、冷负荷的综合需求响应。利用上一章的算法对上述场景进行优化求解, 并对相应负荷曲线进行绘图、数据分析。其中, 用户原始负荷曲线如图 2 所示。



**Figure 2.** Curve: initial load

**图 2.** 用户原始负荷曲线



未考虑 IDR 和主从博弈时,在凌晨 00:00~04:00 和深夜 21:00~24:00 这两个时间段,园区用户正处于休息阶段,原始电负荷曲线偏低。在 05:00~20:00 的时间段,园区用户处于即将工作和正在工作阶段,原始电负荷曲线偏高。在傍晚 17:00~19:00 时段,原始电负荷曲线出现一个尖峰阶段,之后迅速过渡到深夜低负荷阶段。

场景 2 由于考虑了以主从博弈形式实现的综合需求响应,所以某典型日的电、冷、热价不再是固定不变。如图 3 所示,通过对比原始电负荷曲线和 IDR 后的电负荷曲线,可知在 05:00~12:00 这个时间段,电价阶梯状快速上升,使得可控电负荷迅速降低,但因电价已经达到允许波动的最大值,抑制了可控电负荷的变化速率。在 19:00~24:00 时段,电价在某一电价周围波动,理性园区用户会据此不断调整自身的可控电负荷,使低谷时段与高峰时段间的过渡更加平缓。在傍晚 17:00~19:00 时段,电负荷需求响应降低了该处的尖峰负荷,但由于电价的波动范围有限,电价型可控负荷的可响应的转移量受限,使得该处仍保有些许峰值。图 4 所示为可控电负荷曲线与电价变化曲线。

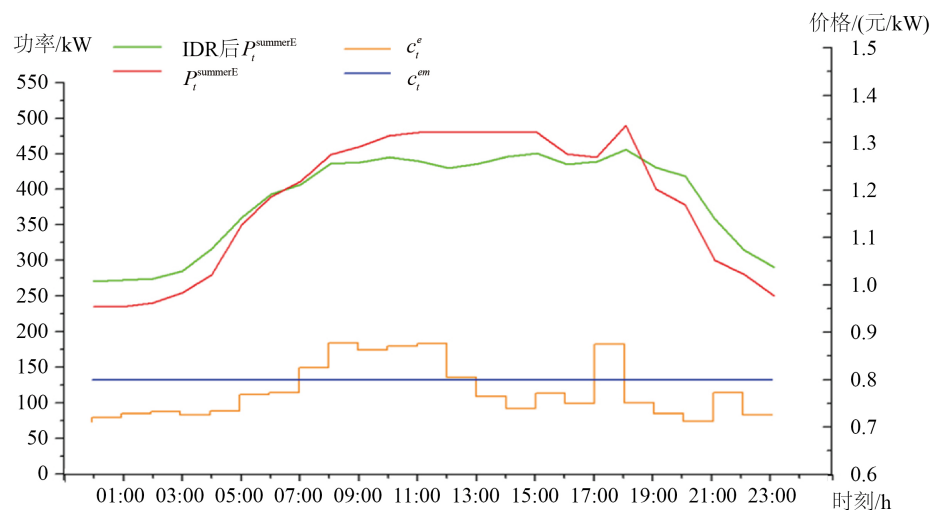


Figure 3. Curve: electrical load before and after IDR, price of electricity

图 3. 原始电负荷、IDR 后的电负荷、电价曲线

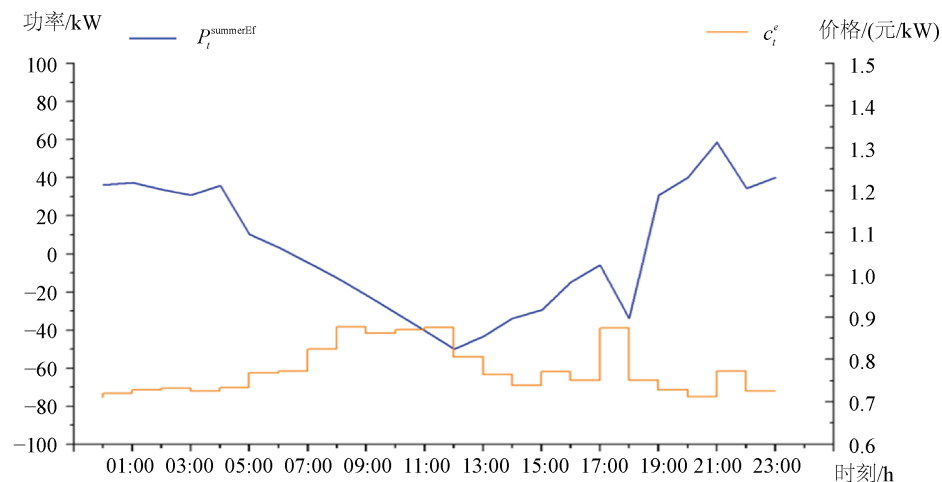


Figure 4. Curve: controlled electrical load after IDR, price of electricity

图 4. IDR 后的可控电负荷、电价曲线

如图 5 所示, 原始热负荷曲线, 在 06:00~08:00 时段和 19:00~20:00 时段, 由于用户清晨与傍晚的供暖、供热需求, 使得该时段出现热负荷峰值。如图 6 所示, 对可控热负荷曲线与热价变化曲线进行分析, 可知在热负荷高峰时段的刚性热负荷很多, 虽然热价已经达到最大值, 但是可转移的热负荷不大, 所以在考虑热负荷需求响应后, 仍然有较为明显的尖峰出现。在 20:00~21:00 时段, 热价在较低的位置, 转移到该时段的热负荷激增, 在 21:00~22:00 时段, 热价迅速攀升至较高的位置, 该时段的热负荷迅速转移到其他时段, 从而在 IDR 后的热负荷曲线上表现出较好的填谷效果。

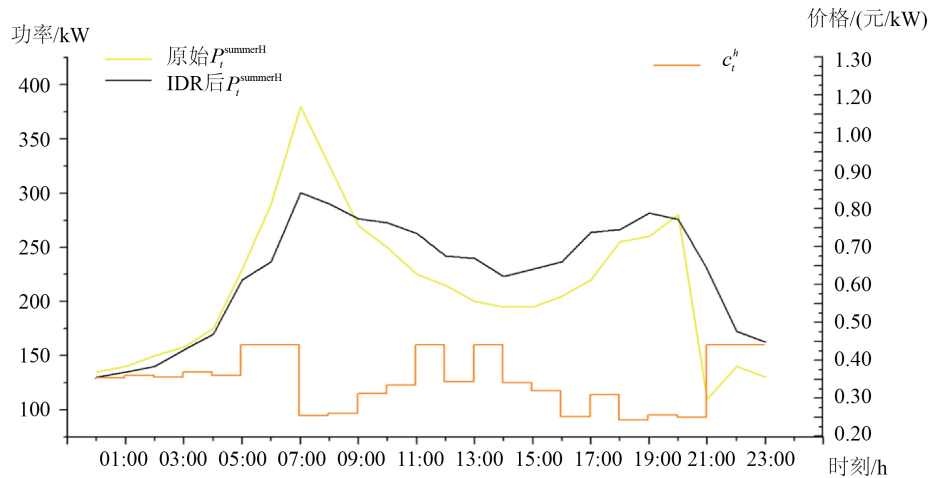


Figure 5. Curve: heat load before and after IDR, price of heat  
图 5. 原始热负荷、IDR 后的热负荷、热价曲线

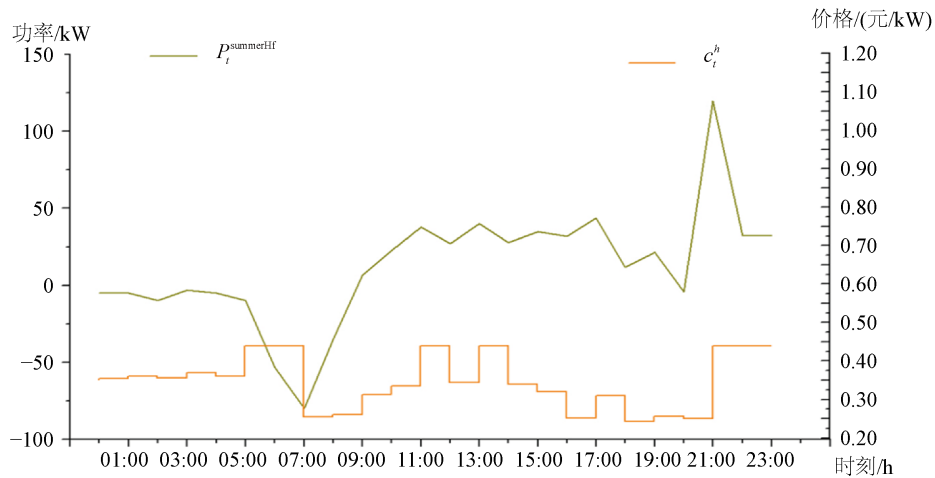
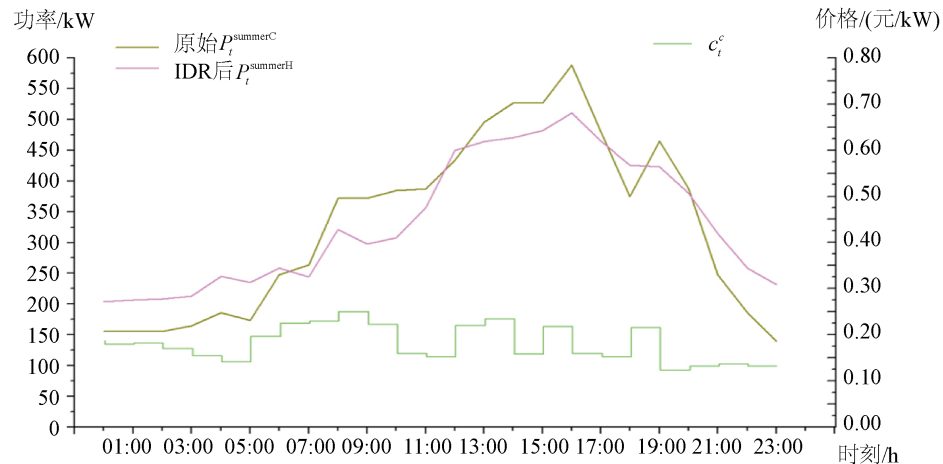


Figure 6. Curve: controlled heat load after IDR, price of heat  
图 6. IDR 后的可控热负荷、热价曲线

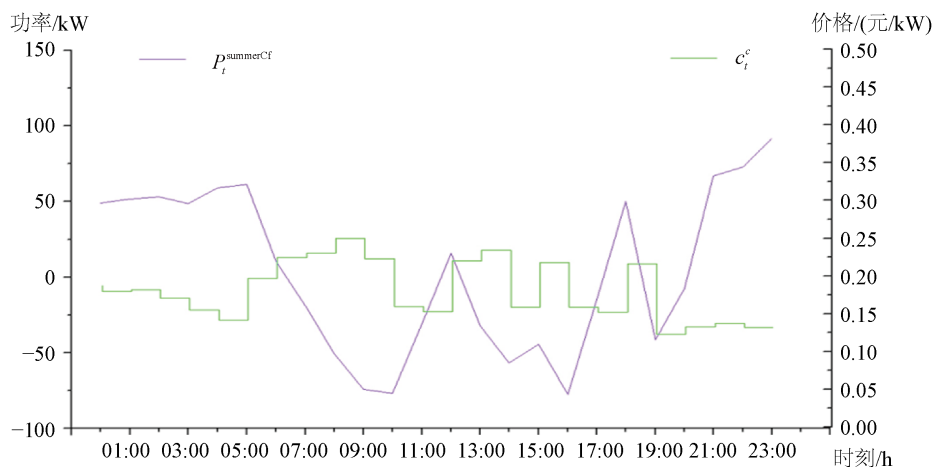
在模型建立时, 考虑了园区拥有的 CCHP 等能流耦合设备, 增加了冷这种能源形式的供给与需求, 以及相关变量, 进一步挖掘了综合能源中综合需求响应的优势。

如图 7 所示, 原始冷负荷曲线, 在 05:00~16:00 时段, 由于夏季气温炎热的原因, 用户对冷负荷的需求量迅速攀升, 并在午后 15:00~16:00 时段达到较高的峰值。在 00:00~05:00 时段和 17:00~24:00 时段, 由于用户已经不再工作, 远离了人群集中地带, 且气温属于一天中较低阶段, 该时段的冷负荷需求相对于工作时段较少。如图 8 所示, 对可控冷负荷曲线与冷价变化曲线进行分析, 在 00:00~05:00 与

17:00~24:00 时段, 冷价处于较低阶段, 可控负荷将迅速变为正值, 使得其他时段的冷负荷转移到了该时段的量增加。对用户而言, 能够减少自身的购能成本。从可控冷负荷数据上来看, 由于原始冷负荷曲线在日中基本处于较高阶段, 所以可转移冷负荷量很小, 冷负荷尖峰没有消除。



**Figure 7.** Curve: cooling load before and after IDR, price of cooling  
**图 7.** 原始冷负荷、IDR 后的冷负荷、冷价曲线



**Figure 8.** Curve: controlled cooling load after IDR, price of cooling  
**图 8.** IDR 后的可控冷负荷、冷价曲线

对比传统方案, 本文着重考虑调度策略的经济因素影响和削峰填谷的辅助作用, 另外, 基于实际工程算例, 用以分析人们的生活习惯的形式来阐述综合需求响应引起削峰填谷的内在响应机理。

园区运营商管理的各种能流耦合设备的输出如图 9 所示。通过对该图数据和能流耦合设备的能源转换效率进行分析, 可知, 园区运营商向园区用户提供的冷、热需求大部分来自于地源热泵。这是因为虽然园区运营商从能源供应商处购能时, 购气价低于购电价, 但地源热泵的电制冷、电制热的效率远远高于 CCHP 机组的气转冷、气转热效率, 运营商出于自身收益的考虑, 选择在大部分时段利用地源热泵满足用户冷热需求。在 13:00~16:00 时段, 通过 IDR 后的冷负荷曲线可知, 该时段冷负荷仍然具有较高的峰值阶段, 且地源热泵几乎达到能够输出冷能的最大值, 这时候为了满足用户的冷需求, 运营商在该时段利用 CCHP 机组进行供冷。00:00~05:00 与 20:00~24:00 时段的热负荷是一天中的最低阶段, 大部分是

由其他时段转移过来的负荷，这时候为了增加自身利益，运营商在该时段利用 CCHP 机组进行供热。对于电需求，园区运营商在大部分时段从电网购电后直接售给用户，这也是由于 CCHP 机组的气转电效率比较低。在 09:00~19:00 时段，为了满足电负荷尖峰需求，运营商在该时段利用 CCHP 机组进行供电。

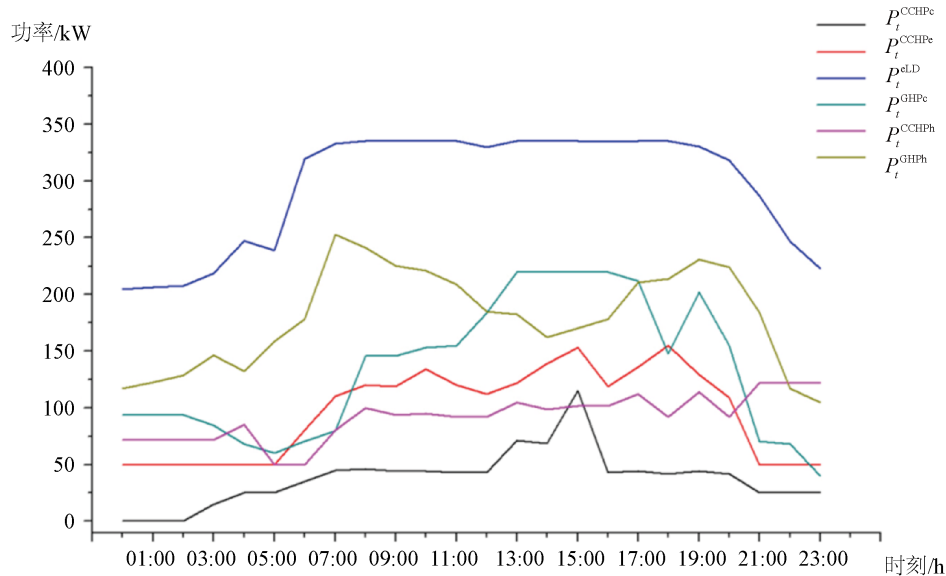


Figure 9. Curve: output power of the energy flow coupling equipment  
图 9. IDR 后的能流耦合设备的输出功率曲线

如表 2 所示，通过经济收益对比可知，在 IESP 考虑需求响应参与运行优化调控时，园区用户购能成本、园区运营商购能成本都有所降低，同时园区运营商的净收益有所增加。用户和运营商双方因进行了主从博弈，双方获利有所提升。

Table 2. Benefit of operators and users  
表 2. 园区运营商和园区用户收益

	园区用户购能成本 (园区运营商售能收益)	园区运营商购能成本	园区运营商净收益 (售能收益与购能成本之差)
场景 1 下	9701.5 元	7859.5 元	1842 元
场景 2 下	9588.2 元	6275.9 元	3312.3 元

本文构建的主从博弈模型很好地从市场角度描述了园区运营商和园区用户之间的互动优化，将传统的电负荷需求响应扩展到电、冷、热综合需求响应，将文献[7]中的广义综合需求响应扩展到更真实的用户侧灵活响应，用户能够自发调整自身用能方式，运营商在调度运行时充分利用用户侧的灵活响应资源，这种优化能够有效提高双方经济性，有利于互动机制可持续运作。

#### 4. 结论与展望

本文以天津大学滨海工业研究院实际园区综合能源微网系统为案例，使用遗传算法，以主从博弈为框架，对目标函数进行求解。通过对求解结果的分析，可以得到如下结论：

- 1) 通过对园区用户可控冷、热、电负荷曲线和冷、热、电价的变化分析可知，当某时段价格上升时，

对应能源的可控负荷将在允许波动的范围内降低,并以转移到其他时段的形式满足用户的需求。当某时段价格下降时,对应能源的可控负荷将在允许波动的范围内上升,其他时段的该种能源需求在本时段将增加。

2) IESP 在考虑用户负荷和运营商互动后,即 IDR 后,电、冷、热负荷的峰谷差,相对于 IDR 前有着显著减少,且不会造成其他时段的负荷激增、越限的情况,使得负荷曲线相对于之前更加平稳。上述情况可以说明 IESP 考虑 IDR 后,能够在保证园区用户正常生产、生活的前提下达到较好的削峰效果。

3) 通过对园区运营商内的能流耦合设备的输入功率和用户冷、热、电负荷需求的分析可知,园区运营商倾向于对能源转换效率更高的地源热泵进行供冷、供热,选择从电网购电向用户供电。从而能够达到最小化用户的购能成本的目的。

下一步的研究方向是准确模拟分时价格下用户的响应行为,考虑园区用户模型的死区拐点、饱和区拐点,使负荷数据更加接近真实负荷曲线。同时 IESP 框架的构建方面,将储电、储热、储冷设备考虑在内,作为后备可控资源,充分实现不同能源的阶梯利用。

## 参考文献

- [1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
- [2] 戚艳,刘敦楠,等.面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J].电力建设,2019,40(1):123-132.
- [3] 于波,孙恒楠,项添春,张鹏.综合能源系统规划设计方法[J].电力建设,2016,37(2):78-84.
- [4] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,吴青华,周孝信.面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J].电网技术,2018,42(6):1687-1696.
- [5] 宋阳阳,王艳松,衣京波.计及需求侧响应和热/电耦合的微网能源优化规划[J].电网技术,2018,42(11):3469-3476.
- [6] 智勇,郭帅,何欣,等.面向智慧工业园区的双层优化调度模型[J].电力系统自动化,2017,41(1):31-37.
- [7] 徐航,董树锋,何仲潇,等.基于多能互补的电/热综合需求响应[J].电网技术,2019,43(2):480-487.
- [8] 周长城,马溪原,郭晓斌,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统互动优化运行方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):74-80.
- [9] 刘军,刘晓磊,高希骏,等.考虑综合需求响应的多能源微网优化协调调度[J].电力与能源进展,2019,7(6):106-117.
- [10] 王富兴,薛正昂,魏言,等.基于燃气与太阳能及地源热泵的分布式能源系统应用研究[J].电力与能源进展,2019,7(1):1-10.
- [11] 闫华光,陈宋宋,钟鸣,等.电力需求侧能效管理与需求响应系统的研究与设计[J].电网技术,2015,39(1):42-46.
- [12] 王先齐,吕智林,汤泽琦.基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J].电力系统保护与控制,2017,45(4):9-18.