

基于冷热电联供的多园区博弈优化策略

吴福保¹, 刘晓峰², 孙谊嫒³, 陈 宁¹, 袁铁江⁴, 高丙团²

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 210003;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096;

3. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830011;

4. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024)

摘要: 园区一般涉及冷、热、电等多种能量流的生产、转换和使用, 通过利用冷热电联供综合能源系统可以有效提高能源利用率、缓解能量供应压力。考虑动态电价机制下园区用电价格受市场需求影响, 不同利益主体间存在博弈竞争关系。鉴于此, 建立了基于冷热电联供的多园区非合作博弈优化模型, 各园区以日运转成本最小为目标函数和其他园区共同参与博弈, 同时考虑联供系统各单元出力、储能设备等约束条件, 实现园区多能流互补协同优化。最后, 以某地区三个园区的冷热电能流协调优化控制为例进行了仿真分析, 算例结果表明所建立的博弈优化模型能合理分配联供系统出力及购电功率, 不仅可以降低园区日运转成本, 而且可以降低电网负荷峰谷差。

关键词: 多园区; 冷热电联供; 分布式电源; 非合作博弈; Nash 均衡

0 引言

随着社会的发展和能源需求的增长, 化石能源紧缺和环境污染问题已成为当今世界各国高度关注的重大战略问题^[1]。现阶段, 社会用电需求主要由化石能源发电供应, 虽然常规发电技术成熟、运行稳定性高, 但能源利用率不高、污染严重等缺点严重制约了它的进一步发展^[2]。因此, 为了满足日益增长的能源需求、提高能源利用率、改善生态环境, 以冷热电联供 (combined cooling heating and power, CCHP) 为核心单元的综合能源系统已成为未来能源技术发展的一个重要趋势, 以及电力能源行业的研究热点^[3-5]。

CCHP 系统主要包括发电机组、制热设备及制冷设备等, 集发电、供热和制冷于一体, 可实现多种能源互补和阶梯利用^[6-7]。该系统所消耗能源通常以天然气、燃油为主, 通过发电机组发电为电负荷提供电能, 并利用余热回收设备、燃气锅炉及制冷机为冷热负荷提供能量来源。相关研究表明, CCHP 系统不仅可使能源利用率达到 70% 甚至超过 90%, 还可大幅减少 NO_x 和 CO₂ 等气体的排放^[8]。

近年来, 国内外关于 CCHP 的研究已有不少报道。文献[9]针对微网 CCHP 系统, 提出了一种通用建模方式, 分别对系统中电气设备进行建模, 进而对系统进行日前经济调度优化。文献[10]将能源消耗最小作为目标函数, 建立了 CCHP 系统线性模型, 并给出不同能源需求下的优化运行策略。文献[11]基于场景分析法对可再生能源随机性进行建模, 并建立了包含新能源、储能及 CCHP 系统的区域综合能源系统联合调度模型。文献[12-13]则从 CCHP 系统不同层面进行分析, 其中, 文献[12]以经济性和环保性为目标, 建立了 CCHP 系统优化模型, 并将发电机组和吸收式制冷机的容量作为决策变量进行了优化; 文献[13]提出了一种基于 CCHP 系统的三级协同整体优化方法, 分别以一次能源利用率最高、CO₂ 排放量最少、运行成本最低为目标, 对设备选型、设备容量、运行参数进行了优化。

上述研究均是以单个微网或园区作为研究对象, 对于多区域 CCHP 系统的研究相对较少。目前, 针对多区域联供系统的研究主要是从热网互联入手, 研究各区域间热能协同消纳及系统容量优化配置等问题^[14-15]。鉴于微网、园区 CCHP 系统一般无法完全满足自身能源需求, 各微网(园区)在用能高峰需要通过大电网购电来维持正常运转。然而, 在动态电价机制下, 电价高低受电网负荷影响^[16-17], 微网(园区)购电费用不仅取决于自身用电量, 还和

收稿日期: 2017-09-14; 修回日期: 2017-11-18。

上网日期: 2018-01-24。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100); 国家自然科学基金资助项目(51577163)。

电网总负荷有关,即不同微网(园区)从大电网购电时存在博弈关系。在上述背景下,本文引入基于 CCHP 的多园区博弈优化机制,充分利用不同园区间的负荷峰谷特性进行园区能量优化管理,从而降低园区运行成本,减小电网负荷峰谷差。首先,基于园区 CCHP 系统、新能源发电、储能等设备出力模型建立其成本模型;其次,建立基于非合作博弈的多园区博弈模型;最后,通过算例仿真验证所提方法的可行性和有益性。

1 含 CCHP 系统的多园区博弈架构设计

本文研究的含 CCHP 系统的多园区博弈架构如图 1 所示。假设某区域电网中共有 N 个园区,某

园区 $n(n=1,2,\dots,N)$ 可通过大电网和燃气管道获得持续的能量供应,园区内部配有 CCHP 系统、储能及分布式电源等设备。由于园区购电费用和电网总负荷有关,所以其在制定购电策略时,不仅需要合理安排自身用电,还要考虑其他园区购电策略对电价产生的影响。也就是说,在制定购电和购气策略时,各园区为了日运行成本最小化会和其他园区在制定购电量策略上进行博弈,直至所有园区的购电量达到均衡状态。因此,为了在博弈中最大限度地降低运行成本,园区会通过优化协调 CCHP、储能及分布式电源运行模式来制定最优策略。另外,本文仅假设园区购电价格与电网负荷相关,而购气价格不受燃气量的影响,视为定值。

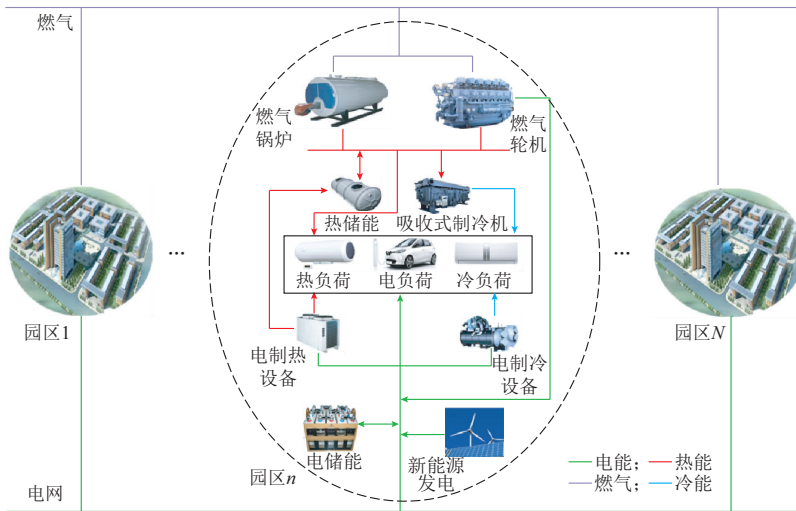


图 1 含 CCHP 系统的多园区博弈架构

Fig.1 Game structure among multiple parks with CCHP system

由图 1 可见,用户负荷分为电、热、冷负荷。为增加系统用能灵活性,园区还配有电制冷和电制热设备,可利用电能为热、冷负荷提供能量。当用电高峰电价较高时,园区通过增加燃气轮机出力为电负荷提供电能,同时燃烧产生的余热可提供给热、冷负荷,余热不足时可向燃气锅炉补充燃气提供额外热量用于供热和供冷。当用电低谷电价较低时,园区主要以从电网购电的方式来满足园区各类负荷,还可通过电制热设备将电能转化为热能并由储热设备进行存储。同时,园区配备的分布式电源也可作为园区电能来源的重要途径之一,既可为电负荷供电,又可由电储能设备进行存储,进而可为其他时段提供能量。

2 园区系统出力和成本分析

园区涉及能量生产和转换的设备主要有燃气轮机、燃气锅炉、分布式电源、吸收式制冷机和电制热

(冷)设备。

2.1 CCHP 设备出力模型

1)燃气轮机。燃气轮机是 CCHP 系统重要的能量输出设备,燃料燃烧释放的高温热能经燃气轮机发电后,余热由余热锅炉进行回收再利用^[18]。该设备输出的电功率及回收的热功率可以表示为^[19]:

$$\begin{cases} p_{gt}^{ne} = \eta_g^e \lambda_{gas} \gamma_{gt}^{ne} \\ p_{gt}^{nh} = \eta_g^h (1 - \eta_g^e) \lambda_{gas} \gamma_{gt}^{ne} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_{gt}^{ne} 和 p_{gt}^{nh} 分别为园区 n 在 t 时段的电功率和回收的热功率; η_g^e 和 η_g^h 分别为燃气轮机发电效率和余热回收效率; λ_{gas} 和 γ_{gt}^{ne} 分别为天然气热值和燃气消耗速率。

2)燃气锅炉。当用户热负荷需求较大时,燃气轮机提供的回收热量无法满足用户,此时需向燃气锅炉添加额外燃气提供热能,其热功率输出为^[20]:

$$p_{br}^{nh} = \eta_b^h \lambda_{gas} \gamma_{br}^{nh} \quad (2)$$

式中: p_{br}^{nh} 和 γ_{br}^{nh} 分别为燃气锅炉 t 时段热功率和燃

气消耗速率; η_b^h 为燃气锅炉产热效率。

3) 能量转换设备。园区 CCHP 涉及电、热和冷三种能量转换的设备包括吸收式制冷机、电制热(冷)设备。上述设备用于不同能量转换时可认为只与转换效率有关, 即

$$\begin{cases} p_{ct}^{nh} = \eta_h^e p_{hr}^{nc} \\ p_{ct}^{nc} = \eta_c^e p_{ct}^{nc} \\ p_{hr}^{nc} = \eta_c^h p_{ct}^{nh} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_{hr}^{nc} , p_{ct}^{nc} , p_{ct}^{nh} 分别为 t 时段电制热设备输入电功率、电制冷设备输入电功率、吸收式制冷机输入热功率; p_{ct}^{nh} , p_{ct}^{nc} , p_{hr}^{nc} 分别为各设备对应的输出热功率、冷功率; η_h^e , η_c^e , η_c^h 分别为电制热设备、电制冷设备、吸收式制冷机的转换效率。

2.2 园区运转成本模型

本文所考虑的园区运转成本仅涉及各类设备的运行维护成本, 并不考虑园区新建各类设备的固定资产投资成本。

1) 分布式电源成本。园区配有光伏和风力发电设备, 其运行维护成本由发电出力决定^[21], 即光伏和风力发电设备 t 时段成本为:

$$C_{ren}^n(t) = K_{PV} p_{PVt}^{nc} \Delta t + K_{WT} p_{WTt}^{nc} \Delta t \quad (4)$$

式中: p_{PVt}^{nc} 和 p_{WTt}^{nc} 分别为 t 时段光伏和风力发电设备输出电功率; K_{PV} 和 K_{WT} 分别为光伏和风力发电设备单位电量运行维护成本; Δt 为 t 时段时间间隔。

2) 储能成本。园区配有电、热储能设备, 由于热储能多以水作为储热介质, 其运行维护成本相对于电储能较小, 因此本文不予考虑。电储能能在 t 时段的运行维护成本为:

$$C_{sto}^n(t) = K_{EES} (p_{EESt}^{nch} + p_{EESt}^{ndis}) \Delta t \quad (5)$$

式中: K_{EES} 为电储能装置单位电量运行维护成本; p_{EESt}^{nch} 和 p_{EESt}^{ndis} 分别为设备充、放电功率。

3) CCHP 设备成本。CCHP 系统涉及燃气轮机、燃气锅炉、吸收式制冷机、电制热设备、电制冷设备。假设该类设备运行维护成本均与其能量出力呈线性关系^[22], 即

$$C_{chp}^n(t) = \sum_{i=1}^5 K_i p_{it}^n \Delta t \quad (6)$$

式中: $i=1 \sim 5$ 表示上述 5 种设备; K_i 为第 i 种设备的单位运行维护成本; p_{it}^n 为 t 时段设备输出功率。

4) 燃气成本。燃气成本主要来源于燃气轮机和燃气锅炉, 其成本可表示为:

$$C_{gas}^n(t) = c_{gas} (\gamma_{gt}^{nc} + \gamma_{bt}^{nh}) \Delta t \quad (7)$$

式中: c_{gas} 为天然气价格。

5) 电能成本。园区购电主要用来满足用户电负

荷, 也可以给热负荷和冷负荷提供能量来源。本文规定各园区从大电网购电采用动态电价机制^[17], 即

$$c_{ele}(t) = a_t P_{gridt}^e + b_t \quad (8)$$

因此, 园区 n 的购电费用为:

$$C_{ele}^n(t) = c_{ele}(t) p_{gridt}^{ne} \Delta t \quad (9)$$

式中: a_t 和 b_t 为 t 时段电价参数; $P_{gridt}^e = \sum_{n=1}^N p_{gridt}^{ne}$ 为园区总购电功率, 其中 p_{gridt}^{ne} 为 t 时段园区 n 购电功率。

3 多园区非合作博弈策略分析

3.1 园区经济调度模型

结合各单元成本模型, 含 CCHP 系统的园区协调优化的目标是在满足系统运行约束条件下使得园区日运转成本最小。目标函数可表示为:

$$\min C_{ost}^n = \sum_{t=1}^T (C_{ren}^n(t) + C_{sto}^n(t) + C_{chp}^n(t) + C_{ele}^n(t) + C_{gas}^n(t)) \quad (10)$$

式中: T 为一日调度总时段数。

目标函数式(10)约束条件主要为能量守恒约束、各单元出力约束、储能设备约束, 具体如下。

1) 能量守恒约束, 包括电负荷功率守恒、热负荷功率守恒和冷负荷功率守恒:

$$p_{gridt}^{ne} + p_{gt}^{nc} + p_{PVt}^{nc} + p_{WTt}^{nc} + p_{EESt}^{ndis} = p_{EESt}^{nch} + p_{lt}^{nc} + p_{hr}^{nc} + p_{ct}^{nc} \quad (11)$$

$$p_{ct}^{nh} + p_{gt}^{nh} + p_{hr}^{nh} + p_{TESt}^{ndis} = p_{TESt}^{nch} + p_{lt}^{nh} + p_{ct}^{nh} \quad (12)$$

$$p_{ct}^{nc} + p_{hr}^{nc} = p_{lt}^{nc} \quad (13)$$

式中: p_{lt}^{nc} , p_{lt}^{nh} , p_{lt}^{nc} 分别为园区电、热和冷负荷; p_{TESt}^{nch} 和 p_{TESt}^{ndis} 分别为热储能设备充热功率和放热功率。

2) 出力约束:

$$0 \leq p_{jt}^n \leq p_{j, \max}^n \quad (14)$$

式中: j 表示除图 1 中各类用户负荷以外的任意一类设备; p_{jt}^n 为第 j 类设备的输出功率; $p_{j, \max}^n$ 为第 j 类设备的最大输出功率。

3) 储能设备约束:

$$\begin{cases} S_{EES}^n(t) = S_{EES}^n(t-1) + \eta_{EES}^{ch} p_{EESt}^{nch} \Delta t - \frac{p_{EESt}^{ndis} \Delta t}{\eta_{EES}^{dis}} \\ S_{TES}^n(t) = \eta_{TES} S_{TES}^n(t-1) + \eta_{TES}^{ch} p_{TESt}^{nch} \Delta t - \frac{p_{TESt}^{ndis} \Delta t}{\eta_{TES}^{dis}} \\ S_{EES, \min}^n \leq S_{EES}^n(t) \leq S_{EES, \max}^n \\ 0 \leq S_{TES}^n(t) \leq S_{TES, \max}^n \\ p_{EESt}^{nch} p_{EESt}^{ndis} = 0 \\ p_{TESt}^{nch} p_{TESt}^{ndis} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $S_{EES}^n(t)$ 和 $S_{TES}^n(t)$ 分别为电储能和热储能在 t

时段的储能量; $S_{EES, \min}^n, S_{EES, \max}^n, S_{TES, \max}^n$ 分别为电储能容量最小值、最大值及热储能容量最大值; η_{EES}^{ch} 和 η_{EES}^{dis} 分别为电储能的充电和放电效率; $1 - \eta_{TES}$, $\eta_{TES}^{ch}, \eta_{TES}^{dis}$ 分别为热储能 Δt 时段的损耗率, 以及热储能的充热和放热效率。

3.2 园区非合作博弈模型

鉴于园区购电价格 $c_{ele}(t)$ 由区域电网所有园区购电量决定, 所以园区 n 的日运转成本不仅取决于自身对购电量和购气量策略的安排, 还与其他参与者的策略有关, 即园区决策会受其他园区决策行为的影响, 因此各园区参与的能源购置策略优化过程属于典型的非合作博弈。在所述非合作博弈中, 园区参与博弈的决策变量为各时段购电量, 但由于各时段购气量、储能设备充放电量等决策变量均和购电策略紧密相关, 一旦购电策略发生变化, 其他决策均会发生变化。因此, 本文所建立的博弈模型将园区购气量等决策变量也视为博弈决策变量, 共同参与非合作博弈中。基于目标函数式(10), 园区之间的非合作博弈可以建立为如下形式^[23-24]。①参与者: 所有园区 $n=1, 2, \dots, N$; ②策略集: 园区所有决策变量; ③收益函数: 园区 n 的收益函数定义为

$$R^n(\mathbf{x}_t^n, \mathbf{x}_t^{-n}) = -C_{ost}^n \quad (16)$$

式中: $\mathbf{x}_t^n = [p_{grid}^{ne}, \gamma_{gt}^{ne}, \gamma_{bt}^{nh}, p_{EES}^{ne}, p_{EES}^{dis}, p_{TES}^{ch}, p_{TES}^{dis}, p_{bt}^{ne}, p_{ct}^{ne}, p_{ct}^{nh}]$ 表示园区 n 在 t 时段的策略优化集; $\mathbf{x}_t^{-n} = [x_1^1, \dots, x_t^{n-1}, x_t^{n+1}, \dots, x_t^N]$ 表示除园区 n 以外的 $N-1$ 个园区的策略。

任一园区参与博弈的目的都是希望通过优化策略集实现自身利益最大化。一旦所有园区利益都达到最大后, 并且没有园区再会改变自身策略, 则该均衡状态就是 Nash 均衡, 即

$$R^n(\mathbf{x}_t^{n*}, \mathbf{x}_t^{-n*}) \geq R^n(\mathbf{x}_t^n, \mathbf{x}_t^{-n*}) \quad n=1, 2, \dots, N \quad (17)$$

式中: $(\mathbf{x}_t^{n*}, \mathbf{x}_t^{-n*})$ 表示 Nash 均衡解。Nash 均衡解的存在性证明可参见文献[25]定理 1; 进一步, Nash 均衡解的唯一性证明可参见文献[25]定理 3。

对于上述 N 个园区之间的非合作博弈, 其 Nash 均衡的求解步骤如下。

步骤 1: 初始化参数。

步骤 2: 在可行域内随机赋予园区 n ($n=1, 2, \dots, N$) 策略集 \mathbf{x}_t^n 的初始值。

步骤 3: 针对优化对象园区 n , 将其他 $N-1$ 个园区策略视为定值, 利用内点法在可行域内求解式(16)最大值下的最优策略 \mathbf{x}_t^n , 并令园区 n 最大收益 $R^n(\mathbf{x}_t^{n*}, \mathbf{x}_t^{-n*}) = R^n(\mathbf{x}_t^n, \mathbf{x}_t^{-n*})$, $\mathbf{x}_t^{n*} = \mathbf{x}_t^n$ 。

步骤 4: 与步骤 3 类似, 将优化对象以外园区策

略视为定值, 依次求解其他 $N-1$ 个园区在可行域内的最优策略, 更新 $\mathbf{x}_t^{-n*} = \mathbf{x}_t^{-n}$ 。

步骤 5: 重复步骤 3 和 4, 直到所有园区策略集 $(\mathbf{x}_t^{n*}, \mathbf{x}_t^{-n*})$ 不再发生改变。此时, $(\mathbf{x}_t^{n*}, \mathbf{x}_t^{-n*})$ 即为 Nash 均衡解下各园区的策略集。

4 算例仿真分析

4.1 算例数据及假设

假设某区域电网共有 3 个园区, 每个园区配有 CCHP 系统, 风、光伏发电设备, 以及电、热储能。其中, CCHP 系统各设备参数设置如下^[20]: 燃气轮机发电效率 $\eta_g^e = 0.3$, 余热回收效率 $\eta_g^h = 0.8$; 热泵、电制冷、吸收式制冷机的转换效率分别为 $\eta_h^e = 4.5$, $\eta_c^e = 4$, $\eta_c^h = 0.7$; 电热储能容量限值为 $S_{EES, \min}^n = 0.5 \text{ MW} \cdot \text{h}$, $S_{EES, \max}^n = 2.5 \text{ MW} \cdot \text{h}$, $S_{TES, \max}^n = 2 \text{ MW} \cdot \text{h}$; 电热储能充、放电效率为 $\eta_{EES}^{ch} = \eta_{EES}^{dis} = 0.95$, $\eta_{TES}^{ch} = \eta_{TES}^{dis} = 0.9$ 。由于用电负荷具有峰谷特性, 为了能够实现削峰填谷, 一般峰时电价要高于谷时电价, 具体如下: 谷时段(时段 1~6, 23~24), $a_t = 14 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})^2$, $b_t = 371 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$; 平时段(时段 7~11, 14~19), $a_t = 21 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})^2$, $b_t = 728 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$; 峰时段(时段 12~13, 20~22), $a_t = 28 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})^2$, $b_t = 1183 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。另外, 天然气价格为 $c_{gas} = 2.7 \text{ 元}/\text{m}^3$, 热值 $\lambda_{gas} = 9.7 \times 10^{-3} (\text{MW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。园区负荷分为电、热、冷负荷, 其中, 园区 1 电负荷、园区 2 冷负荷、园区 3 热负荷高于其他园区同类负荷。限于篇幅, 该处只给出园区 1 的负荷分布情况, 以及风、光伏发电出力, 如图 2 所示。

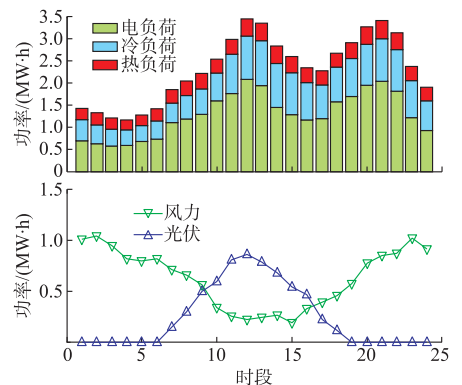


图 2 园区 1 的负荷、光伏和风力发电出力
Fig.2 Load, photovoltaic and wind power output of park 1

基于以上数据, 本文所提方法在 Intel(R) Core (TM) i7-7700 CPU @ 3.60 GHz, 8 GB 内存的计算机上对算例进行了仿真。

4.2 算例结果分析

图3所示分别为园区1,2,3的热系统优化结果,其中,“锅炉+余热”表示向燃气锅炉添加额外燃气提供的热能和余热锅炉提供的热能两者之和,“总热负荷”包括园区自身热负荷及热制冷所需的热负荷,热储设备中的负值表示处于充热状态,正值表示处于放热状态。从图中可以看出,在峰时段和平时段,园区的热负荷基本由CCHP和储能提供;而在谷时段,热负荷基本由电能提供。这是因为峰、平时段电价较高,园区为了降低购电费用选择利用CCHP系统向园区供电,并利用余热提供热能,余热不足时再利用燃气锅炉提供热能;而谷时段电价较低,分布式电源发电过剩,通过分布式发电及电网购电再由电制热的供热方式比CCHP直接供热方式的费用更低。另外,对比三个园区优化结果可以看出,由于园区3热负荷需求量较大,储热设备在谷时段通过电热转换存储了较多能量,以便在晚高峰时段为园区提供热能,从而可以减少供热费用,也可以促进分布式发电的消纳。

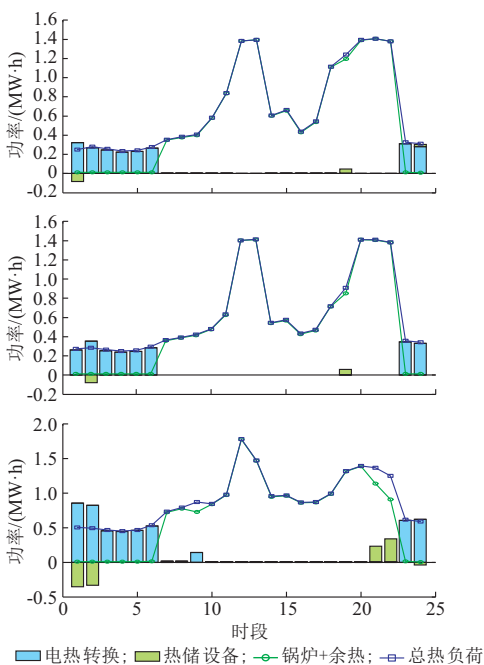


图3 园区热系统优化结果

Fig.3 Optimized results for heating system of parks

图4所示分别为园区1,2,3的电系统优化结果,其中,“总电负荷”包括园区自身电负荷及电制冷、电制热所需的电负荷。从图中可以看出,各园区在谷时段通过分布式电源和大电网对储能设备进行充电,并在峰时段为园区提供电能,从而既可以降低园区能源费用,又可以进一步消纳分布式发电所发电能。CCHP系统在平时段9~10开始启用,随后

在时段10~22系统电出力跟随总电负荷和分布式电源出力波动,其间在时段11~12,19出力达到峰值,因此CCHP系统可以有效降低峰、平时段购电量,从而达到降低能源费用的目的。另外,从各园区各时段购电量可以看出,经过园区博弈优化后,峰时段负荷需求被大大削减,负荷需求峰谷差减小,从而有利于大电网的安全稳定运行。

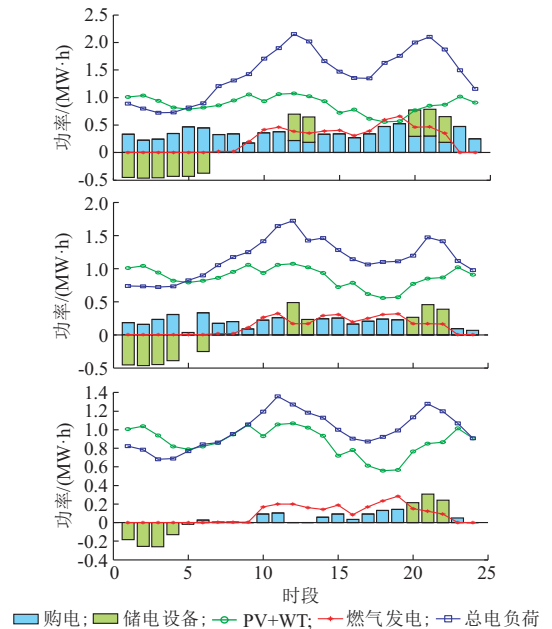


图4 园区电系统优化结果

Fig.4 Optimized results for electric system of parks

同理可得园区冷系统优化结果,由于冷系统供能方式较为简单,在此不再赘述。

4.3 讨论分析

本节首先针对园区在冷热电联合供能方式和冷热电独立供能方式下的日运转成本进行了讨论分析。然后,针对本文开展的多园区非合作博弈优化和单园区优化进行了对比分析。

假设冷热电独立供能方式下的园区配有分布式电源和电储能设备,各类负荷仅由电能提供能量,并且独立供能方式下也采用多园区非合作博弈优化机制。表1所示为园区两种供能方式下的日运转成本对比结果。从表中可以看出,和冷热电独立供能方式相比,在本文所提优化模型下,冷热电三种能流紧密联系在一起,根据不同园区负荷特性合理调节CCHP系统冷热电功率出力,实现了能源的阶梯利用,从而使得园区日运转成本显著降低,其中,园区1成本下降了27.3%,园区2成本下降了20.9%,园区3成本下降了14.2%。从各园区成本下降趋势可以看出,由于联供方式下园区在用电高峰时段可以减少从大电网购电需求,所以对于电负荷需求较大

的园区而言,采用联供方式可以获益更多。

表 1 冷热电联合和独立供能方式下的日运转成本对比
Table 1 Daily operation cost comparison between modes of CCHP and individual power supply

供能方式	成本组成	成本/元		
		园区 1	园区 2	园区 3
冷热电	购电+储能	15 365.6	7 348.2	4 109.7
独立供能	分布式	564.9	564.9	564.9
冷热电联合供能	购电	4 554.0	1 804.2	572.3
	CCHP	6 463.1	3 887.3	2 875.1
	分布式	564.9	564.9	564.9
总成本合计	独立	15 930.5	7 913.1	4 674.6
	联供	11 582.0	6 256.4	4 012.3

在本文所开展的多园区非合作博弈优化模型中,园区在优化分配冷热电能量来源时需要考虑其他园区策略安排对自身的影响,需要根据对手策略不断调节自己的策略。在对比算例中,假设园区采用 CCHP 方式供能,但园区之间不进行博弈,各园区独立优化,每个园区在决策时不考虑其他园区的影响。表 2 所示为 CCHP 方式下,园区在未优化、单园区优化,以及多园区博弈优化时的日运转成本。从表中可以看出,未优化时各园区日运转成本高于有优化时的成本,并且当园区采用本文所提博弈优化模型时,园区的成本会进一步降低。因此,园区为了降低日运转成本愿意参与到博弈优化中。

表 2 CCHP 方式下各算例日运转成本
Table 2 Daily operation cost for different cases with CCHP mode

优化方式	成本/元		
	园区 1	园区 2	园区 3
未优化	13 939.4	7 418.9	4 557.3
单园区优化	11 778.6	6 389.9	4 117.4
多园区博弈	11 582.0	6 256.4	4 012.3

5 结语

本文基于含分布式电源和 CCHP 的园区用能系统,建立了一种多园区多能流协同优化非合作博弈模型,并通过算例分析对所提模型进行了验证,研究结论如下。

1)采用 CCHP 方式为园区供能实现了能源的阶梯利用,不仅可以降低园区日运转成本,还可以促进园区分布式发电的消纳。

2)园区在负荷需求高峰时段采用电网和 CCHP 联合供能,可以减小电网负荷峰谷差,从而有利于电网安全稳定运行。

3)基于园区非合作博弈的多能协同调度优化算法和园区不参与博弈的优化算法相比,园区日运转成本降低幅度更大。

本文所建立的博弈模型中仅考虑电价受需求的影响,并未考虑气价和市场需求之间的关系,因此在考虑电价、气价均受市场影响情况下,园区如何协调用能将会是下一步的研究方向。另外,园区各类负荷在文中均被视为不可转移负荷,实际上园区也有大量可转移负荷,因此在 CCHP 方式下对园区可转移负荷优化调度值得进一步研究。其次,本文所述非合作博弈需要假设博弈参与者必须完全理性,然而现实中的参与者多为有限理性,因此基于有限理性的演化博弈在园区用能方面的协调优化也值得进一步研究。最后,园区一次能源包含了新能源和化石能源,从中近期来看能源系统以新能源为主,但从长期来看新能源是未来 CCHP 系统一次能源的唯一能源来源,一次能源来源及其构成比例对 CCHP 系统的效率有重要影响,需要进一步研究。

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.DOI:10.7500/AEPS20141009011.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [2] 熊焰,吴杰康,王强,等.风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3616-3625.
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [3] 杨永标,于建成,李奕杰,等.含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J].电力系统自动化,2017,41(6):6-12.DOI:10.7500/AEPS20160610002.
YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- [4] GU Wei, WANG Zhihe, WU Zhi, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(5): 2332-2342.
- [5] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267.
- [6] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-591.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591.

- [7] FANG Fang, WANG Qing, SHI Yang. A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1032-1041.
- [8] 周晓倩, 余志文, 艾芊, 等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 26-33.
ZHOU Xiaolian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.
- [9] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 26-33.
- [10] AKISAWA A, MIYAZAKI T, KASHIWAGI T. Theoretical analysis of the optimal configuration of co-generation systems and competitiveness of heating/cooling technologies [J]. Energy, 2010, 35(10): 4071-4078.
- [11] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 1-9. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [12] CARDONA E, PIACENTINO A, CARDONA F. Matching economical, energetic and environmental benefits: an analysis for hybrid CHCP-heat pump systems[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(20): 3530-3542.
- [13] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [14] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20160426010.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20160426010.
- [15] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1316.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.
- [16] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [17] CHEN H, LI Y, LOUIE R H Y, et al. Autonomous demand side management based on energy consumption scheduling and instantaneous load billing: an aggregative game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1744-1754.
- [18] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.
JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3161.
- [19] WANG Jiangjiang, JING Youyin, ZHANG Chunfa. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1325-1335.
- [20] 崔鹏程, 史俊祎, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 101-109.
CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.
- [21] 张明锐, 谢青青, 李路遥, 等. 考虑电动汽车能量管理的微网储能容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4663-4673.
ZHANG Mingrui, XIE Qingqing, LI Luyao, et al. Optimal sizing of energy storage for microgrids considering energy management of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4663-4673.
- [22] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [23] GAO Bingtuan, LIU Xiaofeng, ZHANG Wenhui, et al. Autonomous household energy management based on a double cooperative game approach in the smart grid[J]. Energies, 2015, 8(7): 7326-7343.
- [24] SOLIMAN H M, LEONGARCIA A. Game-theoretic demand-side management with storage devices for the future smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1475-1485.
- [25] ROSEN J B. Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n -person games [J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1965, 33(3): 520-534.

吴福保(1972—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:分布式能源及储能技术。E-mail: wufubao@epri.sgcc.com.cn

刘晓峰(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:需求侧管理和智能配用电。E-mail: lxfqy@163.com

孙谊嫻(1974—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行与控制、网源协调技术。E-mail: syq2920470@163.com

高丙团(1981—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:欠驱动与机器人系统的建模与控制、新能源发电系统的控制与电力需求侧管理。E-mail: gaobingtuan@seu.edu.cn

(编辑 章黎)

Game Optimization Strategy for Multiple Parks Based on Combined Cooling Heating and Power

WU Fubao¹, LIU Xiaofeng², SUN Yiqian³, CHEN Ning¹, YUAN Tiejiang⁴, GAO Bingtuan²

- (1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd., Urumqi 830011, China;
4. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Parks usually involve the production, conversion and use of various energy flows, such as cold, heat, and electricity. By utilizing the combined cooling heating and power (CCHP) system, the energy efficiency can be improved effectively and the energy supply pressure can also be eased. Considering that the market demand will influence the energy price of electricity under the real-time price mechanism, there exists the game competition among different stakeholders. Accordingly, a non-cooperative game model for multiple parks with CCHP system is established, in which the target of each park is to minimize the daily operation cost considering the constraints for power output of CCHP system and storage equipment. The proposed model can realize the collaborative optimization of various energy flows. Finally, the coordinated optimization control of three parks in a certain area is taken as an example. The simulation result shows that the model can allocate CCHP system output and purchase power reasonably, and daily operation cost of parks and peak-valley difference of power system will also be reduced.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900100) and National Natural Science Foundation of China (No. 51577163).

Key words: multiple parks; combined cooling heating and power (CCHP); distributed generator; non-cooperative game; Nash equilibrium