考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度

胡 鹏[1,2],艾 欣[1],杨 昭[1],吴界辰[1],郭良松[2],李庆彪[2],张润恩[2]
(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206;2. 国网乌鲁木齐县供电公司,新疆 乌鲁木齐 830012)

摘要:首先提出了一种含高比例分布式能源的智能园区运行框架,针对综合能源楼宇内冷热电联供系统、电动汽车、温控负荷等资源建立了计及用户用能需求的量化模型。进一步,基于电能双向流动特性,建立园区内多综合能源楼宇群电能共享模型,并通过智能园区代理商制定园区的日前优化调度策略。通过算例仿真,验证了所提方法可通过协调内部综合能源需求侧资源,进行楼宇间电能共享,实现电能供需就近平衡,达到最小化园区调度成本的优化目标。最后,讨论了有无变压器容量限制下的园区与电网的功率交互情况,所提调度策略可通过增加变压器容量约束来避免变压器越限对电网安全运行的不利影响。

关键词:分布式能源;综合能源楼宇群;电能共享;智能园区;日前优化调度;综合能源系统
中图分类号:TM 734 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201908047

0 引言

能源是现代社会经济发展的物质基础和动力源泉。2015年国家发改委、能源局在促进智能电网发展的指导意见中指出"加强能源互联,促进多种能源优化互补"[1]。综合能源系统通过集成能量转化、存储装置及各类用能负荷,在实现多能互补与集成优化、提高用能效率方面具有显著优势[2]。智能园区用能设备多样,综合能耗比重不断增大,在冷热电联供CCHP(Combined Cooling,Heating and Power)技术的支持下,园区可实现能量的高效梯级利用。同时园区内部蕴含大量运行方式灵活、柔性可调的终端资源,成为当前开展综合能源系统需求侧管理的热点[3-5]。文献[3-5]针对园区的多能协同优化调度问题,采用分时电价、价格补偿引导、多能互补等综合需求响应IDR(Integrated Demand Response)手段协调园区能量枢纽的能量生产和消费过程。随着高比例分布式能源DERs(Distributed Energy Resources)渗透率的提高,园区用户侧电能的生产和消费方式发生了变化,用户终端设备可以通过信息互联和能量互动实现智能用电以及电能与信息的双向交互[6]。以上文献仅考虑了电网到需求侧的电能单向流动过程,在应用于所有参与者对等接入的能源互联网市场方面存在局限。

与此同时,配售分离市场改革的深入使市场交易更加开放透明。智能楼宇用户侧聚合屋顶光伏发电PV(PhotoVoltaic)[7]、住宅储能系统ESS(Energy Storage System)、电动汽车EV(Electric Vehicle)、温控负荷TCLs(Thermostatically Controlled Loads)[8]等需求侧资源,将作为新型利益主体参与市场竞争。相较于智能楼宇独立运行模式,智能园区作为智能楼宇用户与市场交互的过渡层,为解决智能楼宇个体能源容量小、随机性强等带来的可控性低的问题提供了有效手段。同时,智能园区代理商可利用智能楼宇用电行为的良好互补特性和交互关系[9],满足供需就地平衡,能源就近消纳,在降低电能传输成本的同时发挥资源共享互济的优势,间接性为线路进行扩容,实现降本增效。目前已有大量研究着眼于多主体电能共享互动[9-14]。文献[9]以智能建筑群为多利益主体应用场景,构建了智能建筑群电能日前优化共享模型;文献[10]针对家庭能源管理系统,通过共享储能的方式向楼宇和电网提供电能,但对能量流向的优先次序未做考虑;文献[11]提出公共连接点PCC(Point of Common Coupling)下的家庭能源系统调度策略,通过低于电网的内部电价鼓励用户参与楼宇间的能量共享;文献[12]研究了楼宇间的电能分配策略,在楼宇内集群EV用电成本最小的基础上考虑其他资源调度成本最小;文献[13-14]将能量共享的研究范围扩大到综合能源系统,从能量利用率的角度出发,以能量共享的方式解决互联CCHP型微网源荷侧电热比不匹配造成的能量浪费问题,同时提高了微网运行的经济性。

基于此,本文针对配售分离环境下的园区代理商提出一种面向含高比例分布式能源的智能园区内综合能源楼宇群日前调度策略,并对园区运行框架进行阐述。在此框架下,以含PV、EV及CCHP系统的综合能源楼宇群为研究对象进行分析建模。在满足用户舒适度与用能需求的基础上,考虑变压器和线路容量约束,以最小化园区运行成本为目标,制定分时电价下园区同电网的电能交互计划,协调楼宇

收稿日期:2019-04-12;**修回日期:**2019-07-10
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900500);北京市自然科学基金资助项目(3182037)
Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900500) and Beijing Natural Science Foundation (3182037)

间的电能流动过程，通过园区内部能量共享实现电能的就近消纳，在获得经济效益的同时实现整体资源最优利用。

1 智能园区运行框架说明

智能园区内有多个互相连接的综合能源楼宇。综合能源楼宇以CCHP系统为核心，其供能模式如附录A中图A1所示。楼宇从天然气网购入燃气进行电能生产，热能作为副产品经能量转换装置以满足用户热水需求，保证室内舒适温度。此外，楼宇内含屋顶PV、EV、TCLs等需求侧资源。综合能源楼宇整合“源-荷-储”资源，内部三者相互配合以满足楼宇内用户用电、冷、热负荷需求为基础，剩余电能通过双向流动的形式作为整体参与园区内部能量共享，对外表现为一种兼具电能消费和产出双重特性的单元。

本文借鉴文献[12]及北欧电力市场运行机制构建了含高比例分布式电源的智能园区参与日前电力市场的调度框架，如图1所示。智能园区代理商作为能量管理者，负责统一协调园区智能楼宇群内部资源，进而将园区作为整体，代表其内部资源与电网进行交互，是智能楼宇与电网间能量互动的过渡层。在日前调度过程中，园区代理商基于电力市场历史电价，结合用户用电数据、舒适度等信息，从园区运行经济性的角度出发，在满足用户用能需求的基础上，制定楼宇内产用能计划、楼宇间电能共享计划。代理商在制定日前调度策略过程中仅作为电价的接受者，考虑园区内变压器及线路容量约束，通过协调内部的能量，实现电能的就近消纳，提出园区整体同电网的电能交互计划并上报至电力市场。电力市场结合输电系统管理者TSO（Transmission System Operator）安全校核及各代理商的竞价情况下达最终的电价信息及园区调度方案。本文工作仅针对园区代理商日前调度计划的制定过程。园区上报园区整体同电网的交互功率作为电力市场的调度依据，最终

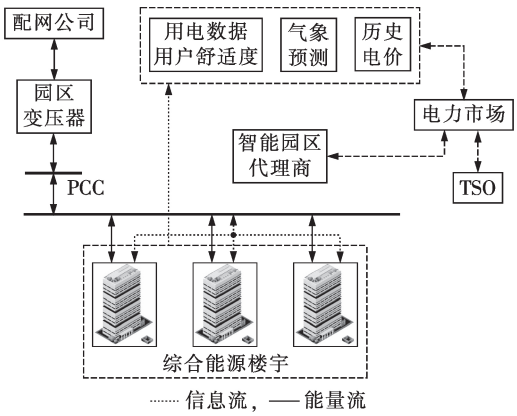


图1 智能园区运行框架

Fig.1 Operational framework of intelligent community

的园区内能量共享及用户用电计划将根据市场情况作进一步调整，在此不作考虑。

园区对外通过PCC经园区变压器与电网进行能量交互：当园区内电能不足时，从电网购电来满足电能需求；当园区内电能过剩时，将多余的电能返送至电网。在园区内部，代理商负责协调楼宇间的双向功率流动，从园区整体运行角度而言，内部共享部分电能内部消纳，不会因电网互动购售电价差产生运行费用。楼宇电力需求更倾向于通过临近的楼宇得到满足，从而降低园区内变压器的压力。

2 综合能源楼宇资源模型的建立

2.1 CCHP系统模型

CCHP系统以燃气轮机为核心设备，燃气轮机燃烧天然气输出电能的同时，产生高温烟气，经一系列转换供给系统冷、热负荷。CCHP系统模型已在较多文献中有所体现，具体见附录B。

2.2 TCLs模型

2.2.1 热水器模型

本文采用一阶阻容模型描述热水器温度的动态变化过程。

$$c^{\mathrm{wh}}\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{wh}}}{\mathrm{d}t}=q^{\mathrm{wh}}-q^{\mathrm{hwd}}+\frac{T^{\mathrm{amb}}-T^{\mathrm{wh}}}{r^{\mathrm{wh}}} \tag{1}$$

其中，c^{wh}为电热水器热容，J/℃，r^{wh}为等效热阻，℃/W，计算公式见文献[15]；T^{wh}、T^{amb}分别为热水、外界温度，℃；q^{wh}为热水器对水箱的热功率注入，W；q^{hwd}为大楼热水需求，W。

对式(1)进行离散化，得到热水温度与热水需求、注入热量及外界温度三者的关系为：

$$T_{t+1}^{\mathrm{wh}}=aT_t^{\mathrm{wh}}+cq_t^{\mathrm{wh}}+dT_t^{\mathrm{amb}} \tag{2}$$

其中，对应的系数a、c、d详细描述如下。

$$\begin{cases} a=1-\dfrac{\Delta t}{r^{\mathrm{wh}}c^{\mathrm{wh}}}-\dfrac{c_{\mathrm{p}}\rho V_{\mathrm{hwd},t}}{c^{\mathrm{wh}}} \\ c=\dfrac{\Delta t}{c^{\mathrm{wh}}} \\ d=\dfrac{\Delta t}{r^{\mathrm{wh}}c^{\mathrm{wh}}}+\dfrac{c_{\mathrm{p}}\rho V_{\mathrm{hwd},t}}{c^{\mathrm{wh}}} \end{cases} \tag{3}$$

其中，c_{p}为水的比热容，取值为4.2×10^3 J/(kg·℃)；ρ为水的密度，取值为1 kg/L；$V_{\mathrm{hwd},t}$为t时段用水量需求，L。

忽略热水器电能与热损耗。为满足用户对水温的要求，热水温度需在用户可接受范围内，即：

$$T_{\min}^{\mathrm{wh}}\leqslant T_t^{\mathrm{wh}}\leqslant T_{\max}^{\mathrm{wh}} \tag{4}$$

其中，$T_{\max}^{\mathrm{wh}}$、$T_{\min}^{\mathrm{wh}}$分别为用户可接受水温上、下限，℃。

2.2.2 房间冷负荷模型

$$\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C^{\mathrm{a}}}\left[\xi WQ^{\mathrm{rad}}+V^{\mathrm{aw}}(T^{\mathrm{w}}-T^{\mathrm{a}})S-P^{\mathrm{cool}}\right] \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}T^{\mathrm{w}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C^{\mathrm{w}}}\left[\xi SQ^{\mathrm{rad}}+V^{\mathrm{aw}}(T^{\mathrm{w}}-T^{\mathrm{a}})S+V^{\mathrm{we}}(T^{\mathrm{amb}}-T^{\mathrm{w}})S\right] \tag{6}$$

其中，T^{a}、T^{w}分别为房屋内部和房屋墙体温度，℃；C^{a}、C^{w}分别为房屋内部和房屋墙体的热容量，J／K；Q^{rad}为太阳辐射能量，W／m²；V^{aw}、V^{we}分别为房屋内部与房屋墙体以及房屋墙体与外界的热传递速率，W／(m²·K)；ξ为太阳辐射效率；S为房屋外墙面积，m²；W为窗户面积，m²；P^{cool}为房间制冷功率，W。

对式(5)和式(6)进行离散化并表示为如下矩阵形式：

$$\boldsymbol{x}(t+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{\delta}(t) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{x}(t)=[\,T_t^{\mathrm{a}}\quad T_t^{\mathrm{w}}\,]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

其中，矩阵$\boldsymbol{A}$反映了房屋传输热和储存热能力对室内及墙体温度的影响；矩阵$\boldsymbol{B}$为控制系数矩阵，包含制冷系统能效系数信息；$\boldsymbol{u}(t)$为控制量矩阵，对于房间温度部分表示制冷功率，墙体温度的控制量为0；$\boldsymbol{\delta}(t)$表征环境因素对系统温度的影响，包括外界温度和太阳辐射。

考虑用户舒适度，房屋内部温度具有如下约束：

$$T_{\min}^{\mathrm{a}}\leqslant T_t^{\mathrm{a}}\leqslant T_{\max}^{\mathrm{a}} \tag{9}$$

其中，$T_{\max}^{\mathrm{a}}$、$T_{\min}^{\mathrm{a}}$分别为用户舒适温度上、下限，℃。

2.3　集群EV模型

单辆EV模型包括EV功率及能量等约束，详见附录C。

集群EV模型为：

$$P_{b,t}^{\mathrm{EV}}=\sum_{i=1}^{b_{\mathrm{v}}}(P_{i,t}^{\mathrm{ch}}x_{i,t}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t}^{\mathrm{dsh}}x_{i,t}^{\mathrm{dsh}}) \tag{10}$$

其中，$P_{b,t}^{\mathrm{EV}}$为楼宇b内EV总功率，kW；b_{v}为楼宇b内EV总数；$P_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{dsh}}$分别为t时段第i辆EV的充、放电功率，kW；$x_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$x_{i,t}^{\mathrm{dsh}}$为0／1变量，表征EV充、放电状态。

3　智能园区优化调度模型

3.1　代理商调度策略目标函数

智能园区代理商根据市场电价信息，管理园区内部资源，协调楼宇间的电能共享过程，剩余的电能需求和电能产出将与电网进行交互。园区调度策略以实现园区调度成本最小化为目标。园区整体运行成本包括同电网交互成本、各楼宇内CCHP系统的燃料成本及EV的电池损耗成本。

$$\min\sum_{t=1}^{T}\left[(P_t^{\mathrm{buyfromg}}c_t^{\mathrm{buy}}-P_t^{\mathrm{selltog}}c_t^{\mathrm{sell}})\Delta t+c^{\mathrm{gas}}F_t^{\mathrm{gas}}+C_t^{\mathrm{ev}}\right] \tag{11}$$

$$C_t^{\mathrm{ev}}=\sum_{i=1}^{b_{\mathrm{v}}}\frac{C_i^{\mathrm{bat}}}{L_i^{\mathrm{c}}E_i d_i^{\mathrm{DOD}}}P_{i,t}^{\mathrm{dsh}}x_{i,t}^{\mathrm{dsh}}/\eta^{\mathrm{dsh}}\Delta t \tag{12}$$

$$\begin{cases}P_t^{\mathrm{buyfromg}}=\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{b}}}P_{b,t}^{\mathrm{buyfromg}}\\ P_t^{\mathrm{selltog}}=\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{b}}}P_{b,t}^{\mathrm{selltog}}\end{cases} \tag{13}$$

$$F_t^{\mathrm{gas}}=\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{b}}}F_{b,t}^{\mathrm{gas}} \tag{14}$$

其中，P_t^{buyfromg}、P_t^{selltog}分别为t时段园区与电网交互的购、售电量，kW；c_t^{buy}、c_t^{sell}分别为t时段园区购、售电电价，元／(kW·h)，由电力市场获得；C_t^{ev}为t时段EV电池放电的损耗成本，元，计算公式见式(12)；C_i^{bat}为EV电池购买成本，元；L_i^{c}为EV电池在生命周期内的充放电循环次数；d_i^{DOD}为EV电池可用放电深度；F_t^{gas}为t时段园区天然气消耗量，m³；$P_{b,t}^{\mathrm{buyfromg}}$、$P_{b,t}^{\mathrm{selltog}}$分别为$t$时段楼宇$b$从电网的购电量和向电网的售电量，kW；$F_{b,t}^{\mathrm{gas}}$为$t$时段楼宇$b$燃气轮机消耗天然气量，m³；$N_{\mathrm{b}}$为园区内楼宇数。

3.2　园区内能量约束

楼宇的电能输出首先将参与内部电能共享，另一部分电能将通过PCC流向电网，见式(15)。电能来源同理，见式(16)。

$$P_{b,t}^{\mathrm{export}}=P_{b,t}^{\mathrm{selltog}}+P_{b,t}^{\mathrm{exporttob}} \tag{15}$$

$$P_{b,t}^{\mathrm{import}}=P_{b,t}^{\mathrm{buyfromg}}+P_{b,t}^{\mathrm{importfromb}} \tag{16}$$

其中，$P_{b,t}^{\mathrm{exporttob}}$为$t$时段楼宇$b$送向其他楼宇的功率，kW；$P_{b,t}^{\mathrm{importfromb}}$为$t$时段由其他楼宇送入楼宇$b$的功率，kW。

忽略线路损耗，同一时段园区内输送到其他楼宇的功率将由其他楼宇消纳，电能共享过程中存在功率平衡约束。

$$\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{b}}}P_{b,t}^{\mathrm{exporttob}}=\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{b}}}P_{b,t}^{\mathrm{importfromb}} \tag{17}$$

代理商通过管理园区内电能交易过程，实现园区内楼宇的产消平衡。

$$(P_{b,t}^{\mathrm{import}}x_{b,t}^{\mathrm{import}}-P_{b,t}^{\mathrm{export}}x_{b,t}^{\mathrm{export}})+P_{b,t}^{\mathrm{PV}}+P_{b,t}^{\mathrm{GT}}=P_{b,t}^{\mathrm{wh}}+\sum_{m=1}^{b_{\mathrm{m}}}P_{b,m,t}^{\mathrm{AC}}+P_{b,t}^{\mathrm{EV}}+P_{b,t}^{\mathrm{load}} \tag{18}$$

其中，$x_{b,t}^{\mathrm{import}}$、$x_{b,t}^{\mathrm{export}}$为0／1变量，表征楼宇$b$的电能送入、输出状态，为保证电能在同一线路不会同时流入、流出，应满足式(19)所示约束；$P_{b,t}^{\mathrm{PV}}$为t时段楼宇b内PV发电功率，kW；$P_{b,t}^{\mathrm{GT}}$为t时段楼宇b内燃气轮机发电功率，kW；$P_{b,t}^{\mathrm{wh}}$为热水器功率，kW，假设热水器电功率全部转化为热功率，即$P_{b,t}^{\mathrm{wh}}=q_{b,t}^{\mathrm{wh}}$；$b_{\mathrm{m}}$为楼宇$b$内空调数量；$P_{b,t}^{\mathrm{load}}$为楼宇$b$的不可控负荷，kW。

$$x_{b,t}^{\mathrm{import}}+x_{b,t}^{\mathrm{export}}\leqslant 1 \tag{19}$$

CCHP系统采用“以热定电”的运行方式，热水器的加热需求通过换热装置满足，房间制冷采取“多能互补”方式，由吸收式制冷机和电制冷机共同

提供。

$$\eta^{HX} H_t^{HX} = q_t^{wh} \tag{20}$$

$$P_t^{cool} = C_t^{LBR} + COP^{AC} P_t^{AC} \tag{21}$$

其中，η^{HX}为换热装置效率；P_t^{AC}为t时段为空调功率，kW；COP^{AC}为空调能效系数；H_t^{HX}为输入换热装置的热量，kW；C_t^{LBR}为吸收式制冷机提供的制冷功率，kW。

3.3 线路与变压器容量约束

$$0 \leqslant P_{b,t}^{import} \leqslant P_b^{line} \tag{22}$$

$$0 \leqslant P_{b,t}^{export} \leqslant P_b^{line} \tag{23}$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} P_t^{buyfromg} \leqslant P_t^{tranlim} x_t^{tran} \tag{24}$$

$$\sum_{b=1}^{N_b} P_t^{selltog} \leqslant P_t^{tranlim} (1 - x_t^{tran}) \tag{25}$$

其中，P_b^{line}为线路容许最大传输功率，kW；$P_t^{tranlim}$为变压器可承受的最大负载，kW；x_t^{tran}为0／1变量，表征变压器的功率流向。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文以包含3个楼宇的综合能源楼宇群为研究对象。其中，楼宇1内含EV群及CCHP系统，冷负荷供给采取吸收式制冷和电制冷互补的运行方式；楼宇2含有PV资源，TCLs全部采用电热水器、电制冷满足；楼宇3内冷、热负荷均由CCHP系统供给。三者均可在满足自身电能需求的同时对外输送电能。

本文选取夏季典型居民楼宇，采用热水箱集中加热供水，热水器水箱容量为5 000 L，c^{wh}=2.1×10^7 J／℃，r^{wh}=0.3 ℃／W，可接受水温范围为[45，50] ℃；暖通空调系统HVAC（Heating，Ventilation and Air Conditioning）参数见附录A中表A1，ξ=2／3，外界温度、太阳辐射热量参考文献[16]。CCHP系统参数见附录A中表A2，天然气低热值为9.97 kW·h／m^3，天然气的价格为2.2元／m^3。楼宇1含有200辆EV，选取车型为BYDE6，其电池容量为64 kW·h，单位时间最大充放电功率为7 kW，充放电效率为0.95，电池购买成本为9.6万元，放电深度为70%，生命周期内的充放电循环次数为4 000次。采用蒙特卡洛模拟产生EV的并网时间、并网时刻荷电状态，用户行为习惯参考文献[17]，EV可调度时段如附录A中图A2所示。

线路与变压器容量约束如下：线路传输容量上限为1 500 kW，变压器总容量为2 000 kV·A，最大负载率为0.65[18]。

本文购售电价参考工业分时电价[19]，见附录A中表A3。

4.2 仿真结果

本文在MATLAB2018a平台下通过YALMIP调用CPLEX12.7进行算例求解。以30 min为一个时段，全天共48个调度时段。

4.2.1 综合能源楼宇调度情况分析

附录A中图A3为楼宇1、3内CCHP系统燃气轮机出力情况，燃气轮机可视为负的等值电负荷，燃气轮机产出单位电能的燃气费用为0.735 5元／(kW·h)，从楼宇经济性考虑，燃气轮机电价峰值时段电能产出量较大。

楼宇1、2分别采取CCHP和电加热方式供给热水器热负荷，2种不同供能方式下电价对热水器加热功率的影响如图2所示。由于CCHP供热过程伴随电能产出，楼宇1内燃气轮机在高电价时段燃气轮机出力水平较高，相应的热水器加热功率较高，热水保持在舒适温度上限。楼宇2采用电热水器，将在电价较低时段进行预热，而在高峰电价时段热水温度维持在舒适温度下限，对应的热水器温度变化情况如附录A中图A4所示。二者在电价突增时刻（10:00和17:00）的功率变化趋势相反。在热水器热惯性的影响下，热水温度的变化情况与加热功率相比，存在一定的时间延迟。与附录A图A5中用水需求对热水器功率的影响进行对比。在电价影响下，热水器将利用自身的储热特性改变用能情况，但热水需求量与用户生活习惯关系密切，用户热水需求与负荷趋势相似。在18:00—23:00热水需求高峰时段，热水器虽具备一定的储热能力，但为满足用户需求，热水器仍会选择在电价较高的用水高峰时段对热水箱加热，导致电价对热水器功率的引导作用较弱，调峰效果受到制约。

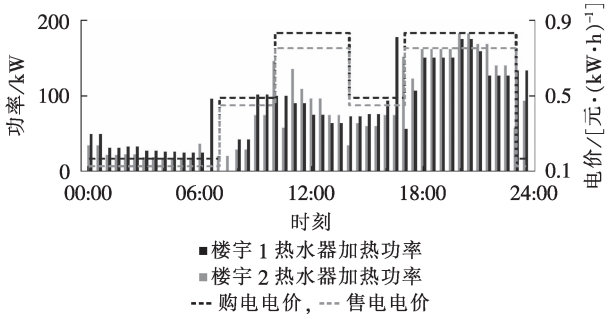


图2 热水器电价响应情况

Fig.2 Response of water heater to TOU

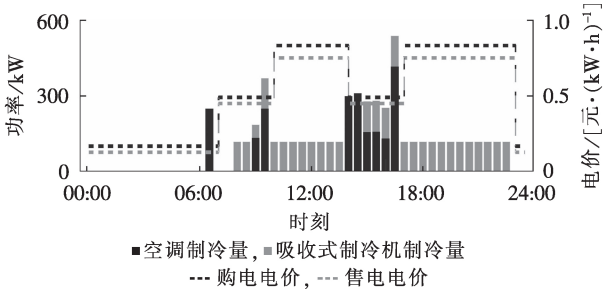


图3 楼宇1冷负荷供给情况

Fig.3 Energy supply of cold load of Building 1

楼宇1的冷负荷供给情况如图3所示，楼宇2、楼宇3的冷负荷情况见附录A中图A6。在用户可接受温度范围内，楼宇1内冷负荷采用“多能互补”的供给方式，高电价时段吸收式制冷机满出力，不足的制冷需求通过电制冷机满足，且电制冷机选择在低电价时段工作，提高了用能灵活性和经济性；楼宇2内电制冷机接受电价响应，选择在低电价时段错峰用电进行预冷，利用建筑热惯性，保持室内温度在舒适区间的同时降低能耗；楼宇3冷负荷由CCHP系统供给，制冷过程伴随电能产出，冷负荷趋势与楼宇2相反。受制冷方式影响，各楼宇室内温度变化情况见附录A中图A7。

4.2.2　园区调度情况分析

附录A中图A8为楼宇1的功率平衡情况。CCHP系统燃气轮机在高电价时段发电供给电负荷，同时满足楼宇冷、热负荷需求。受分时电价引导，EV用户将在保证自身充电需求的情况下选择低谷时段充电、高峰时段放电。EV释放的电能将进行V2B（Vehicle to Building），同时CCHP发电和EV放电用于平衡楼宇内部负荷，剩余部分将被送出楼宇。受EV放电容量和燃气轮机出力水平限制，送出楼宇的电能仅就近参与园区电能共享。附录A中图A9为楼宇2的功率平衡情况。楼宇2内部含有PV资源，在09:00—17:00时段，PV充足，PV和CCHP生产的电能可实现内部自给自足，送出楼宇的部分由其他楼宇消纳或送向电网（10:00—11:00、13:00—15:00）。楼宇3内CCHP系统采取“以热定电”的运行方式，燃气轮机容量较小，产出电能仅提供给楼宇内部电负荷，对外表现为电能的消费者，电能来源包括园区电能共享和从电网购电，内部功率平衡情况见附录A中图A10。楼宇间的电能流动过程由园区代理商协调，楼宇的过剩电能产出通过其他楼宇就近消纳，提高了能量利用率。

园区内部的电能共享情况如附录A中图A11所示。09:00—17:00的电能共享通过楼宇2内PV提供，19:00—23:00的电能共享通过楼宇1内EV放电和燃气轮机共同提供。参与电能共享的部分经由园区代理商协调，送向其他楼宇以满足其用电需求，且在电能共享过程中楼宇间的功率输入输出总量保持平衡。

图4为园区整体与电网的电能交互情况。通过楼宇间的电能共享，白天的负荷需求高峰由PV补充，夜间负荷需求高峰通过EV放电和燃气轮机发电得到补充。在PV出力较大，且园区内负荷水平不高的时段（10:00—11:00、13:00—15:00），PV发电量在满足园区用电需求的基础上，将多余的电量出售至电网，增加园区收益的同时避免了弃光造成电能浪费。在高电价的19:00—23:00时段，大量EV并网，EV释放电能，平抑了一部分负荷高峰，同时该时段CCHP接近满发力，从而减少了园区在该时段与电网侧的交互功率，降低了用电费用，减轻线路和变压器的压力。同时，EV用户选择在负荷低谷时段充电，实现削峰填谷。

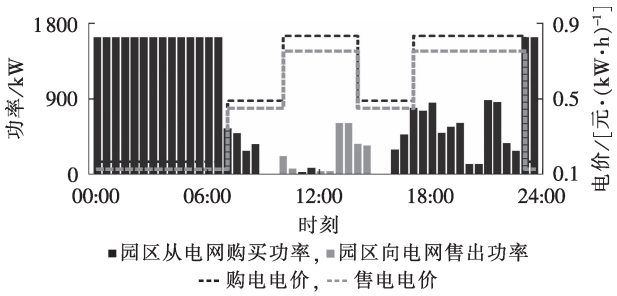


图4　园区与电网的功率交互情况

Fig.4　Power interaction between community and grid

对比有无变压器约束下的园区购售电情况，见图5。园区代理商为实现园区运营成本最低，将协调EV在负荷高峰时段进行最大限度的放电，同时为保证EV用户需求，大量EV需要在夜间集中充电，带来新的负荷高峰，造成变压器越限，对园区内变压器的安全运行造成严重影响。因此园区代理商在制定调度策略时既要考虑经济成本，又要考虑变压器容量限制。园区代理商在考虑变压器容量限制条件下制定调度策略，据此调整用户用电计划及能量流向，从而避免园区与电网交互过程中出现变压器越限的问题。

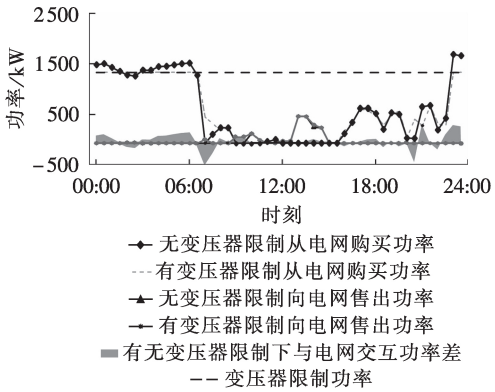


图5　有无变压器容量限制下园区与电网功率交互情况

Fig.5　Power trading with grid under consideration or no consideration of power restriction of transformer

智能园区代理商管理智能楼宇群，在内部电能共享的基础上以整体的形式参与电网互动，对比智能楼宇个体单独与电网交易的成本可知：在独立运行模式下，计及燃料费用、与电网交互的费用和电池损耗费用，总的运行成本即3栋楼宇的运行成本之和为10 812元；而在智能楼宇群能量互动模式下，园区代理商通过协调智能楼宇群间的电能共享，将其作为整体与电网进行交互，减少了由于购售电价差

带来的电网交互成本，整体运行费用降低为10 495元。由此可见，随着智能楼宇群规模的扩大，电能共享的经济效益将愈发凸显。

5 结论

本文以含高比例分布式能源的园区内的综合能源楼宇群为研究对象，从园区运行经济性角度出发，以园区内部供需平衡为重点，制定面向综合能源楼宇群的日前经济优化调度策略。通过算例仿真进行了分析，得到以下主要结论：

(1)构建了一种在高渗透率分布式能源场景下的智能园区内部优化运行框架，应用电能双向流动特性，提出了一种以电能共享为主要手段的新能源消纳方案，该互动方式可实现内部能源在一定程度上的协调互济，提高园区运行的经济性和新能源电能利用率；

(2)分析了不同供能模式下温控负荷的运行情况，相较于传统的“以热定电”和全部由电能进行能量供给的运行方式，“多能互补”的综合需求响应方式在用能的灵活性和经济效益方面具有明显优势；

(3)对所提出的模型和策略进行了仿真验证，结果表明所提出的调度策略能够考虑变压器容量限制，据此调整用户用电计划及能量流向，通过电能共享的方式提高了调度策略的灵活性，可避免园区与电网交互过程中发生变压器过载及功率阻塞，提高了园区电网运行的安全性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献：

[1] 国家发展改革委，国家能源局. 关于促进智能电网发展的指导意见(发改运行[2015]1518号)[R]. 北京：中华人民共和国国家发展和改革委员会，2015.

[2] 艾芊，郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化，2018，42(4)：2-10，46.
AI Qian，HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(4)：2-10，46.

[3] 郭尊，李庚银，周明，等. 计及综合需求响应的商业园区能量枢纽优化运行[J]. 电网技术，2018，42(8)：2439-2447.
GUO Zun，LI Gengyin，ZHOU Ming，et al. Optimal operation of energy hub in business park considering integrated demand response[J]. Power System Technology，2018，42(8)：2439-2447.

[4] 张宇帆，艾芊，郝然，等. 基于机会约束规划的楼宇综合能源系统经济调度[J]. 电网技术，2019，43(1)：108-115.
ZHANG Yufan，AI Qian，HAO Ran，et al. Economic dispatch of integrated energy system at building level based on chance constrained programming[J]. Power System Technology，2019，43(1)：108-115.

[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] 盛万兴，史常凯，孙军平，等. 智能用电中自动需求响应的特征及研究框架[J]. 电力系统自动化，2013，37(23)：1-7.
SHENG Wanxing，SHI Changkai，SUN Junping，et al. Characteristics and research framework of automated demand response in smart utilization[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(23)：1-7.

[7] 邓忻依，艾欣. 分布式光伏储能系统综合效益评估与激励机制[J]. 发电技术，2018，39(1)：30-36.
DENG Xinyi，AI Xin. Comprehensive benefit assessment and incentive mechanism of distributed photovoltaic energy storage system[J]. Power Generation Technology，2018，39(1)：30-36.

[8] 郝文斌，李银奇，张毓格，等. 基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(2)：95-100.
HAO Wenbin，LI Yinqi，ZHANG Yuge，et al. Household electric water heater load scheduling based on demand response[J]. Power System Protection and Control，2019，47(2)：95-100.

[9] 任文诗，高红均，刘友波，等. 智能建筑群电能日前优化共享[J]. 电网技术，2019，43(7)：2568-2575.
REN Wenshi，GAO Hongjun，LIU Youbo，et al. Optimal day-ahead electricity scheduling and sharing for smart building cluster[J]. Power System Technology，2019，43(7)：2568-2575.

[10] SHAFIE-KHAH M，JAVADI S，SIANO P，et al. Optimal behavior of smart households facing with both price-based and incentive-based demand response programs[C]//2017 IEEE Manchester Power Tech. Manchester，UK：IEEE，2017：1-6.

[11] JOO I Y，CHOI D H. Optimal household appliance scheduling considering consumer's electricity bill target[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics，2017，63(1)：19-27.

[12] 吴界辰，艾欣，张艳，等. 配售分离环境下高比例分布式能源园区电能日前优化调度[J]. 电网技术，2018，42(6)：1709-1717.
WU Jiechen，AI Xin，ZHANG Yan，et al. Day-ahead optimal sche-duling for high penetration of distributed energy resources in community under separated distribution and retail operational environment[J]. Power System Technology，2018，42(6)：1709-1717.

[13] 徐青山，李淋，蔡霁霖，等. 考虑电能交互的冷热电多微网系统日前优化经济调度[J]. 电力系统自动化，2018，42(21)：36-44.
XU Qingshan，LI Lin，CAI Jilin，et al. Day-ahead optimized economic dispatch of CCHP multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems，2018，42(21)：36-44.

[14] LIU N，WANG J，WANG L. Hybrid energy sharing for multiple microgrids in an integrated heat-electricity energy system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2019，10(3)：1139-1151.

[15] POURMOUSAVI S A，PATRICK S N，NEHRIR M H. Real-time demand response through aggregate electric water heaters for load shifting and balancing wind generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2014，5(2)：769-778.

[16] 张夏霖，杨健维，黄宇. 含电动汽车与可控负荷的光伏智能小区两阶段优化调度[J]. 电网技术，2016，40(9)：2630-2637.

ZHANG Xialin, YANG Jianwei, HUANG Yu. A two-stage dispatch optimization for electric vehicles and controllable load in PV intelligent community[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2630-2637.

[17] 卫婧菲,刘其辉. 居民小区电动汽车光伏充电站三分段能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):249-255.
WEI Jingfei, LIU Qihui. Tri-period energy management strategy for PV-assisted EV charging station in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 249-255.

[18] 郭毅,胡泽春,张洪财,等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术,2015,39(9):2458-2464.
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.

[19] 徐建军,王保娥,闫丽梅,等. 混合能源协同控制的智能家庭能源优化控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(12):214-223.
XU Jianjun, WANG Bao'e, YAN Limei, et al. The strategy of the smart home energy optimization control of the hybrid energy coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 214-223.

作者简介:

胡　鹏

胡　鹏(1985—),男,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统分析、控制与管理(**E-mail**: hupbin@163. com);

艾　欣(1964—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: aixin@ncepu.edu.cn);

杨　昭(1996—),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(**E-mail**: joyz0413@163.com);

吴界辰(1991—),男,吉林辽源人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统及微网(**E-mail**: wjcncepu@foxmail.com)。

Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing

HU Peng[1,2], AI Xin[1], YANG Zhao[1], WU Jiechen[1], GUO Liangsong[2], LI Qingbiao[2], ZHANG Run'en[2]

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Urumqi County Power Supply Company, Urumqi 830012, China)

Abstract: An intelligent community operation framework with high penetration of distributed energy is firstly proposed. A quantitative model of the CCHP(Combined Cooling, Heating and Power), EV(Electric Vehicle) and TCLs(Thermostatically Controlled Loads) in the intelligent building, which takes the user's energy demand into account, is established. Based on the bidirectional power flow characteristics of the electric energy, a power sharing model of multi-intelligent building group in the community is established and the intelligent community agent formulates a day-ahead scheduling strategy. The simulative results show that the proposed method can coordinate the internal schedulable resources, share the power between buildings, achieve the near balance of power supply and demand, and achieve the optimization goal of minimizing the community scheduling cost. Finally, the power interaction between the community and the grid under the limitation of transformer capacity is discussed. The proposed scheduling strategy can avoid the adverse impact of the transformer over-limit on the safe operation of the grid by considering the transformer capacity constraint.

Key words: distributed energy resource; cluster building with integrated energy system; power sharing; intelligent community; day-ahead optimal scheduling; integrated energy system

附录 A

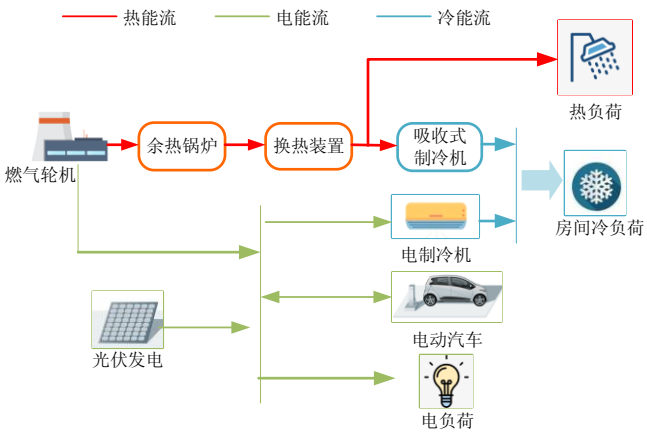


图 A1 综合能源楼宇供能结构图

Fig.A1 Schematic diagram of energy supply structure of CCHP system

表 A1 温控负荷相关参数

Table A1 Parameters of TCLs

参数	楼宇 1	楼宇 2	楼宇 3
C^{a} /(J·K^{-1})	9.2×10^{6}	9.2×10^{6}	9.2×10^{6}
C^{w} /(J·K^{-1})	2.6×10^{7}	2.6×10^{7}	2.6×10^{7}
V^{aw} /[W·(m^{2}·K)$^{-1}$]	10	10	10
V^{we} /[W·(m^{2}·K)$^{-1}$]	40	40	40
S/m^{2}	30	15	15
W/m^{2}	8	4	4
房间数量	80	100	60
电制冷机功率/kW	2.5	1.2	—
能效系数	3	3	—
舒适温度/℃	[24,28]	[24,28]	[24,28]

表 A2 CCHP 系统参数

Table A2 Parameters of CCHP system

参数	数值
P_{max}^{GT} /kW	300
H_{max}^{HRB} /kW	400
H_{max}^{HX} /kW	300
H_{max}^{HX} /kW	200
η^{GTe}	0.3
η^{loss}	0.2
η^{HX}	0.9
η^{LBR}	1.2

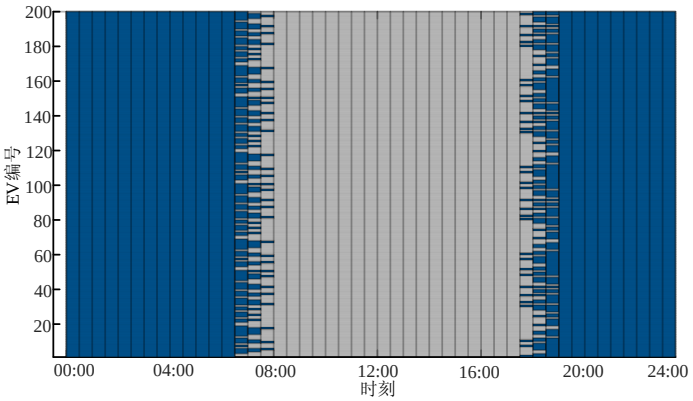


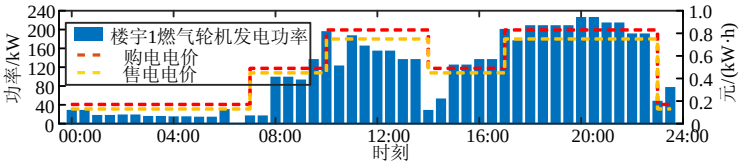
图 A2 EVs 可调度时间

Fig.A2 Schedulable time of EVs

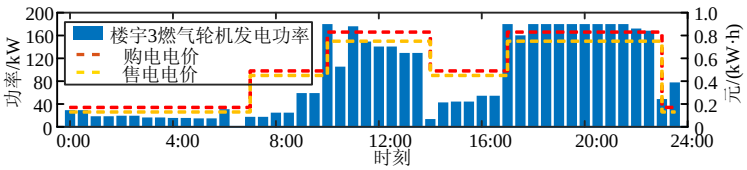
表 A3 购售电分时电价定义

Table A3 Definition of time-of-use power price

属性	时段	购电电价/[元·(kW·h)$^{-1}$]	售电电价/[元·(kW·h)$^{-1}$]
峰	10:00—14:00 17:00—23:00	0.83	0.75
平	07:00—10:00 14:00—17:00	0.49	0.45
谷	23:00—次日 07:00	0.17	0.13



(a) 楼宇 1 燃气轮机出力情况



(b) 楼宇 3 燃气轮机出力情况

图 A3 CCHP 系统燃气轮机出力情况

Fig.A3 Gas turbine output of CCHP system

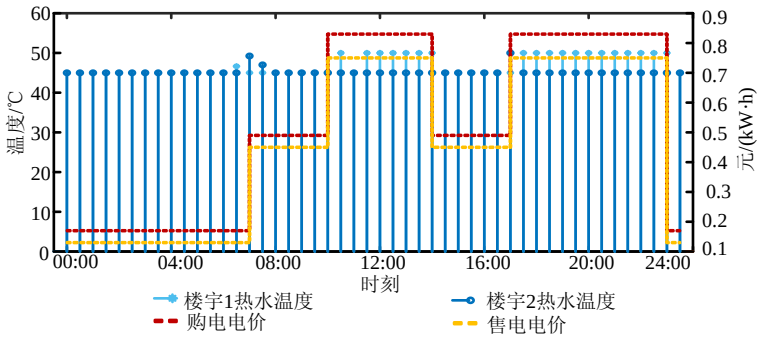


图 A4 热水器温度变化情况

Fig.A4 Temperature of water heater

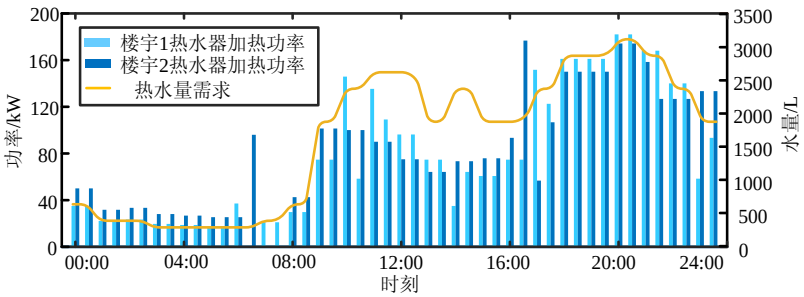
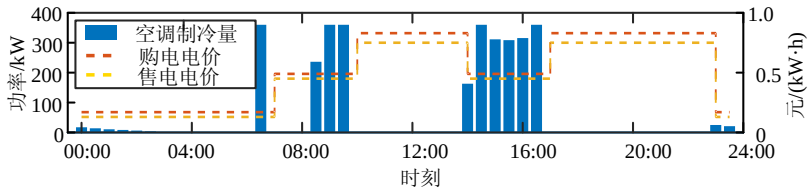
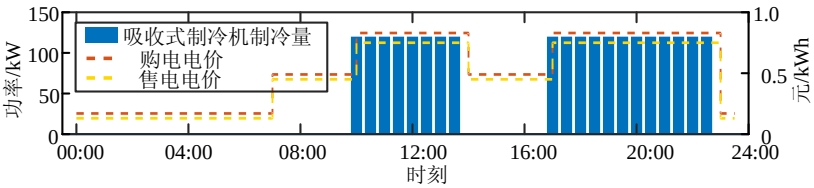


图 A5 热水需求对热水器功率的影响情况

Fig.A5 Impact of hot water demand on power of water heater



(a) 楼宇 2 冷负荷供给情况



(b) 楼宇 3 冷负荷供给情况

图 A6 冷负荷供给情况

Fig.A6 Energy supply of cold load

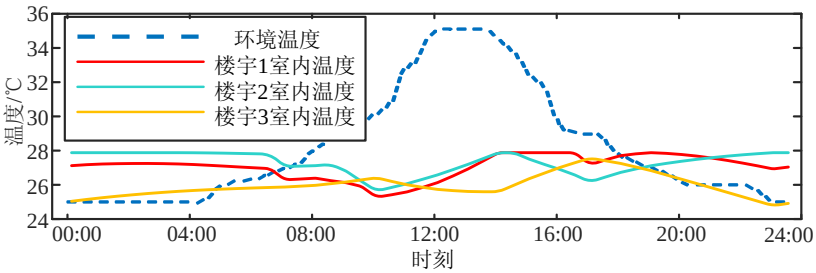


图 A7 楼宇室内温度变化情况

Fig.A7 Indoor temperature of buildings

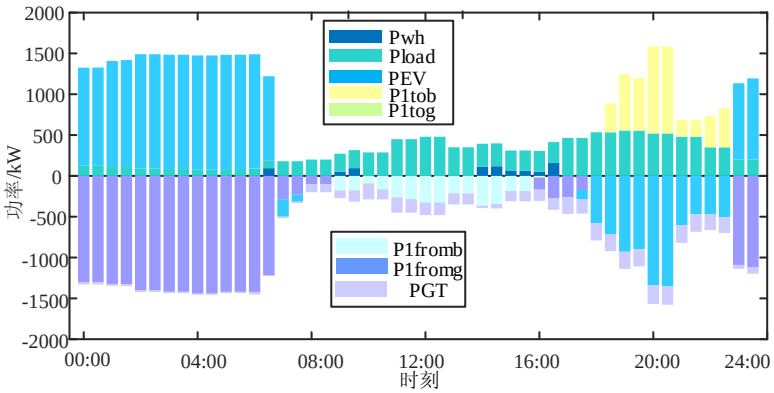


图 A8 楼宇 1 功率分配情况

Fig. A8 Power distribution of Building 1

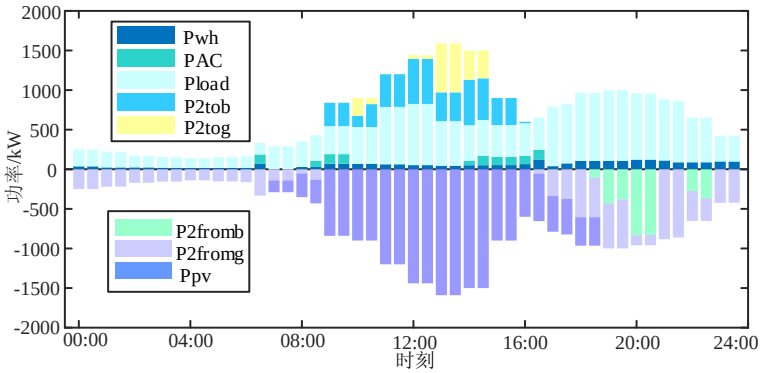


图 A9 楼宇 2 功率分配情况

Fig.A9 Power distribution of Building 2

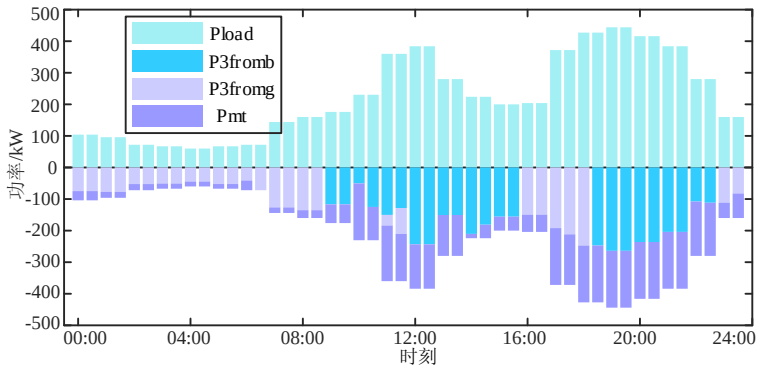


图 A10 楼宇 3 功率分配情况

Fig.A10 Power distribution of Building 3

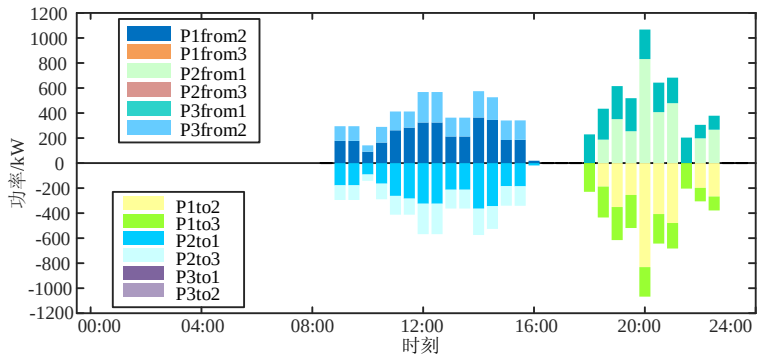


图 A11 园区内电能共享情况

Fig. A11 Power sharing in the community

附录 B

CCHP 系统以燃气轮机为核心设备，燃气轮机燃烧天然气输出电能的同时，热能作为副产品供给热负荷。

$$P_t^{\mathrm{GT}} = F_t^{\mathrm{gas}} \eta^{\mathrm{GTe}} L^{\mathrm{NG}} / \Delta t \tag{B1}$$

$$H_t^{\mathrm{GT}} = P_t^{\mathrm{GT}} \frac{1-\eta^{\mathrm{GTe}} - \eta^{\mathrm{loss}}}{\eta^{\mathrm{GTe}}} \tag{B2}$$

其中，P_t^{GT} 为 t 时段燃气轮机发电功率，kW；F_t^{gas} 为燃气轮机消耗天然气量，m^3；η^{GTe} 为燃气轮机发电效率；L^{NG} 为天然气低热值，本文取 9.97kW·h/ m^3；H_t^{GT} 为排出烟气中的余热量，kW；η^{loss} 为燃气轮机热损失系数。

燃气轮机发电功率满足约束条件：

$$0 \le P_t^{\mathrm{GT}} \le P_{\max}^{\mathrm{GT}} \tag{B3}$$

其中，$P_{\max}^{\mathrm{GT}}$ 为燃气轮机最大出力，kW。

余热锅炉收集烟气余热并转换为高温蒸汽。一部分经换热装置供给楼宇热水需求，另一部分经吸收式

制冷机供给系统冷负荷。

$$H_t^{\mathrm{HRB}} = H_t^{\mathrm{GT}} \eta^{\mathrm{HRB}} \tag{B4}$$

$$H_t^{\mathrm{HRB}} = H_t^{\mathrm{HX}} + H_t^{\mathrm{LBR}} \tag{B5}$$

$$C_t^{\mathrm{LBR}} = \eta^{\mathrm{LBR}} H_t^{\mathrm{LBR}} \tag{B6}$$

其中，H_t^{HRB} 为余热锅炉 t 时段的输出热量，kW；η^{HRB} 为余热锅炉效率；H_t^{HX} 为输入换热装置的热量，kW；C_t^{LBR} 为输入吸收式制冷机的热量，kW；H_t^{LBR} 为吸收式制冷机的制冷量，kW；η^{LBR} 为吸收式制冷机性能系数。

余热锅炉、吸收式制冷机分别满足以下约束：

$$0 \le H_t^{\mathrm{HRB}} / \eta^{\mathrm{HRB}} \le H_{\max}^{\mathrm{HRB}} \tag{B7}$$

$$0 \le H_t^{\mathrm{HX}} \le H_{\max}^{\mathrm{HX}} \tag{B8}$$

$$0 \le H_t^{\mathrm{LBR}} \le H_{\max}^{\mathrm{LBR}} \tag{B9}$$

其中，$H_{\max}^{\mathrm{HRB}}$ 为余热锅炉最大输入功率，kW；$H_{\max}^{\mathrm{HX}}$ 为换热装置最大输入功率，kW；$H_{\max}^{\mathrm{LBR}}$ 为吸收式制冷机最大输入功率，kW。

附录 C

（1）EV 充放电功率约束。

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{ch}} \le P_{\max}^{\mathrm{ch}} \tag{C1}$$

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{dsh}} \le P_{\max}^{\mathrm{dsh}} \tag{C2}$$

其中，$P_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{dsh}}$ 分别为 t 时段 EV 的充、放电功率，kW；$P_{\max}^{\mathrm{ch}}$、$P_{\max}^{\mathrm{dsh}}$ 分别为 EV 最大充、放电功率，kW。

（2）用户充电需求约束。

$$\mathrm{SOC}_{i,t_{\mathrm{a}}} + \sum_{t=t_{\mathrm{a}}}^{t_{\mathrm{l}}} (P_{i,t}^{\mathrm{ch}} x_{i,t}^{\mathrm{ch}} \eta^{\mathrm{ch}} - P_{i,t}^{\mathrm{dsh}} x_{i,t}^{\mathrm{dsh}} / \eta^{\mathrm{dsh}}) \Delta t / E_i \ge \mathrm{SOC}_i^{\mathrm{e}} \tag{C3}$$

$$x_{i,t}^{\mathrm{ch}} + x_{i,t}^{\mathrm{dsh}} \le 1 \tag{C4}$$

其中，t_{a}、t_{l} 分别为 EV 并网起、止时间；$\mathrm{SOC}_{i,t_{\mathrm{a}}}$ 为 EV 初始荷电状态；$x_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$x_{i,t}^{\mathrm{dsh}}$ 为 0/1 变量，表征 EV 充、放电状态，为避免出现 EV 同时充放电的情况，$x_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$x_{i,t}^{\mathrm{dsh}}$ 满足式(C4)约束；η^{ch}、η^{dsh} 分别为 EV 充、放电效率；E_i 为电池容量，kW·h；$\mathrm{SOC}_i^{\mathrm{e}}$ 为 EV 用户离开时的期望荷电状态，本文取 0.9。

（3）EV 荷电状态约束。

$$\mathrm{SOC}_{i,t} = \mathrm{SOC}_{i,t-1} + (P_{i,t}^{\mathrm{ch}} x_{i,t}^{\mathrm{ch}} \eta^{\mathrm{ch}} - P_{i,t}^{\mathrm{dsh}} x_{i,t}^{\mathrm{dsh}} / \eta^{\mathrm{dsh}}) \Delta t / E_i \quad t \in (t_{\mathrm{a}}, t_{\mathrm{l}}) \tag{C5}$$

$$\mathrm{SOC}_{\min} \le \mathrm{SOC}_{i,t} \le \mathrm{SOC}_{\max} \tag{C6}$$

其中，$\mathrm{SOC}_{i,t}$ 为 EV 荷电状态；$\mathrm{SOC}_{\max}$、$\mathrm{SOC}_{\min}$ 分别为 EV 电池允许的荷电状态上、下限，本文分别设置为 1、0.1。