考虑需求侧资源的智能小区综合能源日前优化调度

蔡紫婷1,彭敏放1,沈美娥2

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 北京信息科技大学 计算机学院,北京 100192)

摘要:针对化石能源过度消耗和环境污染问题日益严重的情况,将需求侧资源利用纳入考虑范畴,进行供能侧与用户侧相结合的智能小区综合能源日前优化调度研究。在供能侧,建立接入光伏发电和风力发电的冷热电联供系统,考虑多能互补方式并提出一种增大可再生能源就地消纳的控制策略;在用户侧,提出一种较为精细的负荷分类方法,充分考虑家用储能和电动汽车的充放电功能、用电设备频繁启停行为、电动汽车出行计划安排以及关联设备运行时间约束,并对运行时间具有不可控性的冷热负荷进行优化分析。通过引入供能单价,将供能侧和用户侧相结合进行日前优化调度。算例仿真结果表明,所提方法能有效降低双侧成本,减少环境污染和降低电负荷峰谷差。

关键词:综合能源;智能小区;冷热电联供;多能互补;需求响应;日前调度

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101027

0 引言

世界能源消耗量持续上涨、碳排放强势反弹、化 石能源依赖度居高不下、能效利用率低等一系列问 题,使得全球能源使用面临着严峻的挑战。优化能 源结构、探寻高能效多能互补利用方式具有极为重 要的意义^[1]。以冷热电联供 CCHP(Combined Cooling, Heating and Power)系统为代表的新型综合能 源系统,打破了分供系统分立规划和运行的模式,其 集供电、制冷、制热于一体,以多能互补和能量梯级 利用为基础,通过充分回收利用系统排出的废水和 废烟的余热来进行供冷和供热^[2]。CCHP系统因具 有提高能源利用率、减少环境污染和降低耗能成本 等优点而得到了大力发展^[3]。许多国内外学者从供 能侧的角度对 CCHP系统的优化进行了研究^[47],但 这些研究只着眼于供能侧 CCHP系统的优化调度, 未能考虑到用户侧资源的利用。

近年来,我国居民用电量大幅增加,导致用电高 峰期负荷急剧增大,给电网安全稳定运行带来了巨 大挑战。家庭能量管理系统 HEMS(Home Energy Management System)通过对家用负荷的优化和直接 控制,可以满足用户便捷化和个性化的用能需求,实 现更加科学合理的耗能。基于 HEMS 的用户需求响 应行为使得家用负荷成为一种可控资源^[8]。家用负 荷耗能占比高,可控性大,若能对这种资源加以利 用,并充分优化调度,能有效降低电负荷峰谷差,节 约用户费用和提高电网稳定性^[9-10]。现有的大多数 研究往往仅针对供能侧或用户侧中的单一方面,未

收稿日期:2020-04-30;修回日期:2020-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973107,61472128) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61973107,61472128) 能充分结合供能侧多能互补特性和用户侧需求响应 潜力来进行日前优化调度,具有一定的局限性。而 少数研究将两者相结合进行优化调度,尚存在一些 不足。文献[11]结合了CCHP系统和居民需求响应 行为,但在进行建模时,没有考虑光伏、风电等新能 源发电,优化目标也只考虑了经济性,未能很好地契 合可持续发展需求。文献[12-13]将需求响应引入 能源微网,利用用户侧资源进行源荷协调,但所建立 的用户侧负荷模型较为粗糙,未能提出一种简单准 确的负荷分类方法,也没有考虑负荷间的关联性以 及家用储能和电动汽车等未来将大量使用的设备。

针对现有研究的不足,本文综合考虑供需双侧, 对智能小区综合能源日前优化调度进行研究。首 先,构建供能侧和用户侧框架,提出日前优化调度流 程。然后,分别建立供能侧和用户侧数学模型。在 供能侧,考虑光伏发电和风力发电,提出一种增大可 再生能源就地消纳的控制策略;在用户侧,对用户负 荷进行精细分类,充分考虑了蓄电池和电动汽车的 充放电功能以及电动汽车的出行安排。针对用电设 备频繁启停的问题,引入设备断电次数和设备断电 间隔时间进行约束。由于冷热负荷运行时间的不可 控性,所以在其温度允许范围内进行优化调度。对 于部分具有关联性的设备,提出基于典型日数据和 关联度的关联运行约束。最后,引入供能单价,将供 能侧和用户侧相结合进行日前优化调度。

1 系统总体框架

将小区划分为供能侧和用户侧两部分,其结构 如图1所示。

供能侧包含光伏发电、风力发电及 CCHP 系统 等,以风能、太阳能、电能和天然气为来源,通过多种 能源互补利用,同时为用户提供电能、冷能和热能。



图1 智能小区结构

Fig.1 Structure of smart community

在 CCHP 系统中,电制冷机消耗电能产生冷能,燃气 锅炉消耗天然气产生热能,燃气内燃机消耗天然气 产生电能,同时生成大量高温烟气经余热回收装置 进行回收,供给用户侧冷热负荷,从而实现能量的梯 级利用。当燃气内燃机和燃气锅炉产生的热能大于 冷热负荷需求时,多余热能存储到蓄能装置或耗散 在大气中;当产生的热能小于冷热负荷需求时,蓄能 装置释放能量。此外,吸收式制冷机作为冷热能转 换设备,当电制冷机产生的冷能不足时,吸收式制冷 机可吸收热能转化为冷能,以满足用户冷负荷需求。

用户侧以居民负荷为核心,将负荷划分为电负 荷、冷负荷和热负荷3类,其中电负荷分为不可控负 荷和可控负荷^[14],可控负荷又进一步分为可中断负 荷和不可中断负荷^[15]。考虑到电动汽车和蓄电池既 能作为负荷消耗电能又能作为电源给其他用电设备 供电,对其进行单独建模。通过优化负荷的使用时 间和耗能,可以达到降低电负荷峰谷差和节约用户 费用的目的。

为将供能侧和用户侧相结合进行优化调度,引 入供能单价,得到优化流程图如图2所示。

2 系统模型

2.1 CCHP 系统模型

燃气内燃机及余热回收装置、吸收式制冷机、电 制冷机、蓄冷和蓄热设备的建模见文献[6],燃气锅 炉建模见文献[16],蓄电池建模见文献[11]。为保 证蓄电池每天正常工作,在文献[11]的基础上加入 新约束:要求在调度周期内蓄电池首末状态一致且 等于初始储能量,初始储能量为蓄电池容量的0.2。



Fig.2 Flowchart of optimization

CCHP系统的综合目标函数包含购能成本、环境折算成本和设备运行维护成本。其中,购能成本 f^{ENCest}包含系统从电网购电的费用、购买天然气的费用和向电网售电的收益。

$$f^{\text{ENCost}} = \sum_{t=1}^{T} f_t^{\text{ENCost}} \tag{1}$$

$$f_{\iota}^{\text{ENCost}} = C_{\iota}^{\text{ebuy}} \max\left(0, E_{\iota}^{\text{Grid}}\right) + C_{\iota}^{\text{esale}} \min\left(0, E_{\iota}^{\text{Grid}}\right) + C_{\iota}^{\text{gbuy}} F_{\iota}^{\text{Gas}}$$
(2)

其中, f_t^{ENCost} 为CCHP系统的购能成本,下标t表示t时段;T为全天划分的时段数; E_t^{Grid} 为与电网交互的电能, $E_t^{\text{Grid}} > 0$ 时表示从电网购电, $E_t^{\text{Grid}} < 0$ 时表示向电网售电; F_t^{Gas} 为消耗的天然气总量; C_t^{gbuy} 为从电网购电的电价; C_t^{gase} 为向电网售电的价格; C_t^{gbuy} 为购气价格。

环境折算成本 *f*^{EVCost} 指耗能过程中产生的有害 温室气体(主要为 CO₂、SO₂和 NO_x^[17])破坏环境所造 成的经济成本。

$$f^{\text{EVCost}} = \sum_{t=1}^{T} f_t^{\text{EVCost}}$$
(3)

$$f_{\iota}^{\text{EVCost}} = \sum_{u=1}^{U} \xi_{u} \left(\sigma_{u}^{\text{Coal}} \max\left(0, E_{\iota}^{\text{Grid}}\right) + \sigma_{u}^{\text{Gas}} F_{\iota}^{\text{Gas}} \right) \quad (4)$$

其中, f_t^{EVCost} 为t时段的环境折算成本;U为有害温室 气体的种类数; σ_u^{Coal} 为燃煤产生的第u种有害温室气 体的排放系数; σ_u^{Coal} 为燃烧天然气产生的第u种有害 温室气体的排放系数; ξ_u 为第u种有害温室气体的 处理费用。

设备运行维护成本f^{OMCost}为:

$$f^{\text{OMCost}} = \sum_{t=1}^{T} f_t^{\text{OMCost}}$$
(5)

 $E_{\star}^{
m Grid}$

$$f_{t}^{\text{OMCost}} = C^{\text{ICE}} E_{t}^{\text{ICE}} + C^{\text{WT}} E_{t}^{\text{WT}} + C^{\text{PV}} E_{t}^{\text{PV}} + C^{\text{WHRU}} Q_{t}^{\text{WHRU}} + C^{\text{CB}} Q_{t}^{\text{CB}} + C^{\text{AC}} Q_{t}^{\text{AC, out}} + C^{\text{EC}} Q_{t}^{\text{EC}} + C^{\text{CSE}} Q_{t}^{\text{CSE, out}} + C^{\text{TSE}} Q_{t}^{\text{TSE, out}} + C^{\text{B}} P_{t}^{\text{B, dis}}$$

$$(6)$$

其中, f_{t}^{OMCost} 为运行维护成本; E_{t}^{ICE} 为燃气内燃机的 发电量; E_t^{WT} 为风电机组出力; E_t^{PV} 为光伏机组出力; Q_{v}^{WHRU} 为余热回收装置的热回收量; Q_{c}^{GB} 为燃气锅炉 输出的热量; $Q_t^{AC,out}$ 为吸收式制冷机的释冷量; Q_t^{EC} 为 电制冷机产生的冷能; $Q_{i}^{CSE,out}$ 为蓄冷设备的释冷量; $Q_t^{\text{TSE, out}}$ 为蓄热设备的释热量; $P_t^{\text{B, dis}}$ 为蓄电池放电功 率;C为对应各设备的运行维护成本系数。

综上,供能侧的综合目标函数为:

$$f^{\text{CCHPCost}} = \alpha f^{\text{ENCost}} + \beta f^{\text{EVCost}} + \gamma f^{\text{OMCost}}$$
(7)

其中, α 、 β 、 γ 为各成本的权重因子。

除各设备建模时所包含的相关约束外,约束条 件还应包括如下冷热电供需平衡约束:

$$+ E_t^{\text{PV}} + E_t^{\text{WT}} + E_t^{\text{ICE}} - Q_t^{\text{EC}} - P_t^{\text{B, ch}} + P_t^{\text{B, dis}} = Q_t^{\text{Eneed}} (8)$$

$$Q_t^{\text{EC2}} + Q_t^{\text{AC, out2}} + Q_t^{\text{CSE, out}} \ge Q_t^{\text{Cneed}}$$
(9)

$$Q_t^{\text{GB2}} + Q_t^{\text{WHRU2}} + Q_t^{\text{TSE, out}} \ge Q_t^{\text{Hneed}}$$
(10)

其中,P^{B, ch}、P^{B, dis}分别为供能侧蓄电池充、放电功率: Q_t^{EC2} 为电制冷机产生的由冷负荷直接消耗的冷量; $Q_{t}^{AC, out2}$ 为吸收式制冷机产生的由冷负荷直接消耗的 冷量;Q_t^{GB2}为燃气锅炉产生的由热负荷直接消耗的 热量; Q_t^{WHRU2} 为热负荷直接消耗的热回收量; Q_t^{Cneed} 、 Q_t^{Hneed} 、 Q_t^{Eneed} 分别为用户侧所需冷、热、电能。

2.2 可再生能源就地消纳控制策略

供能侧包含光伏发电和风力发电,为增大光伏 发电和风力发电的就地消纳,提出相应的控制策略, 如图3所示。图中, $E_t^{\text{ECA}} = E_t^{\text{ICE}} + E_t^{\text{PV}} + E_t^{\text{WT}} - E_t^{\text{EC}}$, E_t^{EC} 为电制冷机消耗的电能;S^B为蓄电池储电量;S^{B,max} 为蓄电池储电量上限; $\mu_t^{\text{B,ch}}$ 、 $\mu_t^{\text{B,ds}}$ 分别为蓄电池充、 放电状态变量; η^{B, ch}为蓄电池充电效率; P^{B, ch, max} 为蓄





Fig.3 Control strategy of local consumption for renewable energy

电池最大充电功率。

通过比较系统中发电量和用电量的大小来指导 蓄电池进行动作,从而达到增大可再生能源就地消 纳的目的。当光伏发电量、风机发电量与燃气内燃 机发电量之和大于电制冷机和电负荷需求时,若蓄 电池处于状态上限,此时蓄电池不能充电,多余发电 量售往电网;若蓄电池不处于状态上限,此时强行令 蓄电池进行充电,消耗多余发电量,从而增大可再生 能源就地消纳。蓄电池的充电功率应为多余发电功 率、蓄电池充至满电所需功率以及最大充电功率三 者中的最小值。当发电量之和小于电制冷机和电负 荷需求时,若蓄电池处于状态下限,此时蓄电池不能 放电,所需电量从电网购得;若蓄电池不处于状态下 限,为了充分利用蓄电池的可调度性,此时不将蓄电 池限制于放电模式,而令蓄电池处于既可充电又可 放电的状态,换言之,即便此时用电功率大于发电功 率,蓄电池也可在电价低时从电网购电进行充电,在 电价高时再进行放电,从而节省成本。

2.3 用户侧模型

2.3.1 电负荷

电负荷包含可控负荷和不可控负荷,改变不可 控负荷的使用时间会对用户舒适度产生极大影响, 因此本文不对其进行调度,但不可控负荷作为消耗 电能的一部分,会将其叠加到总的用电需求中。所 有可控负荷都必须在允许运行的起、止时间 Tstart $T_{h_i}^{\text{end}}$ 内完成任务,令 μ_{h_i} 为用户h的设备i的状态变 量, $\mu_{h,i}$ = 1 时表示设备运行, $\mu_{h,i}$ = 0 时表示不运 行,则有:

$$\mu_{h,i,t} = \begin{cases} 0 \ \overline{\mathfrak{B}} 1 & t \in \left[T_{h,i}^{\text{start}}, T_{h,i}^{\text{end}} \right] \\ 0 & t \notin \left[T_{h,i}^{\text{start}}, T_{h,i}^{\text{end}} \right] \end{cases}$$
(11)

令 T_i 为设备i的预计使用时段数,则有:

$$T_{h,i} = \sum_{t=T_{h,i}^{\text{start}}}^{T_{h,i}} \mu_{h,i,t}$$
(12)

针对可中断电负荷出现的频繁启停问题,引入 设备断电间隔时间和设备断电次数对设备短时间内 频繁启停行为进行限制。

()

$$N_{h,i}^{\text{NI}} = \begin{cases} \left(\sum_{t=T_{h,i}^{\text{start}}}^{T_{h,i}^{\text{start}}} \left| \mu_{h,i,t+1} - \mu_{h,i,t} \right| \right) / 2 - 1 \\ \mu_{h,i,T_{h,i}^{\text{start}}} = 0 \boxplus \mu_{h,i,T_{h,i}^{\text{start}}} = 0 \end{cases} (13) \\ \left(\sum_{t=T_{h,i}^{\text{start}}}^{T_{h,i}^{\text{start}}} \left| \mu_{h,i,t+1} - \mu_{h,i,t} \right| - 1 \right) / 2 \quad \text{其他} \end{cases} \\ N_{h,i}^{\text{NI}} \leqslant N_{h,i}^{\text{NI}, \max} (14) \end{cases}$$

$$l_{h,i,k-1} = t_{h,i,k}^{\text{start}} - t_{h,i,k-1}^{\text{end}} \quad k = 2, 3, \dots, K$$
(15)
$$N_{h,i}^{\text{NI}} = K - 1$$
(16)

$$D_{h,i}^{\mathrm{PI}} = \min l_{h,i,k-1}$$
(17)
$$D_{h,i}^{\mathrm{PI}} \ge D_{h,i}^{\mathrm{PI},\min}$$
(18)

其中, $N_{h,i}^{\text{NI}}$ 为用户h的设备i的中断次数; $N_{h,i}^{\text{NI},\text{max}}$ 为用 户提供的最大允许中断次数; $D_{h,i}^{\text{PI}}$ 为最小断电间隔时 间; $D_{h,i}^{\text{PI},\min}$ 为用户提供的最小允许断电间隔时间;K为设备i在允许运行起止时间内的启停次数; $t_{h,i,k}^{\text{start}}$ 为 第k次启动的时间; $t_{h,i,k-1}^{\text{end}}$ 为第k-1次停止的时间; $l_{h,i,k-1}$ 为第k-1次启停的断电间隔时间。

用电设备的关联性包含以下2个方面:一是使 用时间不重叠但存在固定先后顺序的设备,二是使 用时间部分重叠的设备。对于使用时间不重叠但存 在固定前后使用顺序的设备,引入设备的典型日数 据进行分析。若设备m和设备n为关联性设备且在 典型日数据中设备m在设备n之前使用,则有:

$$t_{h,m}^{\text{TR, end}} \leq t_{h,n}^{\text{TR, start}} \tag{19}$$

其中, $t_{h,m}^{\text{TR, end}}$ 为设备m的实际停止时间; $t_{h,n}^{\text{TR, start}}$ 为设备n的实际启动时间。

对于使用时间有重叠的设备,如电饭煲和抽油 烟机,当在进行优化时,将2个设备的运行时段拆分 为2个完全不同甚至是相隔较大的时段,无疑会对 用户的使用舒适度产生极大影响,优化结果将偏离 实际。因此,本文通过计算典型日数据中设备使用 时间重叠度的大小来判断设备之间的关联性,并根 据该关联性大小来合理化设备的启动时间。

首先,计算设备间的关联度。在典型日数据中, 若设备*m*的开始和停止使用时间分别为*t*^{LS,start}和 *t*^{LS,end},设备*n*的开始和停止使用时间分别为*t*^{LS,start}和 *t*^{LS,end},则关联度为:

$$r_{h,mn} = \begin{cases} \frac{A-B}{C-D} & A > B\\ 0 & A \le B \end{cases}$$
(20)

$$\begin{split} A &= \min\left(t_{h,m}^{\text{LS, end}}, t_{h,n}^{\text{LS, end}}\right), \quad B &= \max\left(t_{h,m}^{\text{LS, start}}, t_{h,n}^{\text{LS, start}}\right) \\ C &= \max\left(t_{h,m}^{\text{LS, end}}, t_{h,n}^{\text{LS, end}}\right), \quad D &= \min\left(t_{h,m}^{\text{LS, start}}, t_{h,n}^{\text{LS, start}}\right) \end{split}$$

其中, $r_{h,mn}$ 为设备m和设备n之间的关联度。A>B时,设备m与设备n的使用时段具有重叠性; $A \le B$ 时,设备m与设备n的使用时段不具有重叠性,此时 $r_{h,mn}=0$ 。

利用关联度对设备启停时间进行修正:

$$t_{h,m}^{\text{TR, start}} = \sum_{n=1}^{N} r_{h,mn} t_{h,n}^{\text{TR, start}} / \sum_{n=1}^{N} r_{h,mn} \quad n \neq m$$
(21)

其中,N为与设备m有关联性且典型运行时间重叠的设备个数。

2.3.2 冷热负荷

用户侧冷负荷主要为空间冷负荷,是指在某一 室外温度下,为了达到用户所要求的室内温度,供冷 系统向室内供给的冷量,其模型为:

$$Q_{h,t}^{CK} = C^{wall} S_h^{wall} \left(W_t^{O} - W_{h,t}^{CK} \right) + C^{wd} S_h^{wd} \left(W_t^{O} - W_{h,t}^{CK} \right) + I_t^{SR} S_h^{wd} S^z$$
(22)

其中, $Q_{h,t}^{CK}$ 为用户h的空间冷负荷; C^{vall} 为建筑外墙的 传热系数^[18]; S_{h}^{vall} 为建筑外墙的面积; W_{t}^{0} 为室外温 度; $W_{h,t}^{CK}$ 为用户h设定的室内温度; C^{vd} 为窗户的传热 系数; S_{h}^{vd} 为窗户面积; I_{t}^{SK} 为太阳辐射功率; S^{v} 为遮阳 系数^[19]。

与电负荷的时间可控性不同,冷热负荷的可控 性体现在温度上。若 W^{CK}为用户设定的温度,实际 上当温度在 W^{CK} 附近的一个小范围内波动时,对用 户的舒适度影响不大,因此可设定温度调节范围为:

$$W_h^{CK, \min} \leq W_{h,t}^{CK, \max}$$
 (23)
其中, $W_h^{CK, \min}$ 为室内允许最低温度, $W_h^{CK, \max}$ 为室内允
许最高温度, $W_h^{CK, \min}, W_h^{CK, \max}$ 均由用户给定。

热负荷主要包含热水热负荷和空间热负荷两部 分。其中热水热负荷是指日常生活中使用热水进行 洗漱、洗澡或洗衣服等形成的热负荷:

$$Q_{h,t}^{\mathrm{HW}} = C^{\mathrm{HW}} \left(W_{h,t}^{\mathrm{HW}} - W_{t}^{\mathrm{CW}} \right) L_{h,t}^{\mathrm{HW}}$$
(24)

其中,Q^{HW}为热水热负荷;C^{HW}为热水供热系数;W^{HW}_{b,t} 为热水温度;W^{CW}为冷水温度,本文假设冷水温度与 室外温度一致;L^{HW}为热水用量。

空间热负荷与空间冷负荷类似,其模型为:

$$Q_{h,t}^{\mathrm{HK}} = C^{\mathrm{HK}} V_h^{\mathrm{hm}} \left(W_{h,t}^{\mathrm{HK}} - W_t^{\mathrm{O}} \right)$$
(25)

其中, Q^{HK} 为空间热负荷; C^{HK} 为建筑单位体积的传 热系数; V^{hm} 为建筑体积; W^{HK}_{h,t} 为用户设定的室内温 度。同理有:

$$W_{h}^{\mathrm{HW,\,min}} \leqslant W_{h,t}^{\mathrm{HW}} \leqslant W_{h}^{\mathrm{HW,\,max}} \tag{26}$$

$$W_h^{\mathrm{HK,\,min}} \leqslant W_{h,t}^{\mathrm{HK}} \leqslant W_h^{\mathrm{HK,\,max}} \tag{27}$$

其中, $W_h^{HW,min}$ 为热水允许最低温度; $W_h^{HW,max}$ 为热水允 许最高温度; $W_h^{HK,min}$ 为室内允许最低温度; $W_h^{HK,max}$ 为 室内允许最高温度。

2.3.3 电动汽车

考虑电动汽车的充电和放电功能,对电动汽车 进行建模。当电动汽车无出行计划时,其建模与蓄 电池类似,不再赘述。当电动汽车有出行计划时,为 保证用户出行时电动汽车有充足的电量,本文以用 户每天出行时电动汽车为满电状态来进行充电安 排,如式(28)所示。在出行时段,电动汽车的储电量 *E*^{EV}与前一时段的储电量*E*^{EV}_{h,t-1}以及行驶的里程数有 关,如式(29)所示。

$$E_h^{\rm EV, \, out} = E_h^{\rm EV, \, max} \tag{28}$$

$$E_{h,t}^{\mathrm{EV}} = E_{h,t-1}^{\mathrm{EV}} - \omega_{h,t}^{\mathrm{EV}} \xi^{\mathrm{EV}}$$
(29)

其中, $E_{h}^{EV,out}$ 为用户h出门时电动汽车储电量; $E_{h}^{EV,max}$ 为电动汽车满电状态下的储电量; $\omega_{h,t}^{EV}$ 为电动汽车行驶的里程数; ξ^{EV} 为每千米耗电量。

2.3.4 目标函数

用户侧以耗能成本、电池老化成本和电负荷平 坦度成本最少为目标函数。

$$f^{\text{UCost}} = \sum_{h=1}^{H} \sum_{t=1}^{T} \left[H_{t}^{\text{SP}} \left(P_{h,t}^{\text{E}} + Q_{h,t}^{\text{CK}} + Q_{h,t}^{\text{HW}} \right) \right]$$
(30)

$$f^{\text{BOCost}} = \sum_{h=1}^{H} \sum_{t=1}^{T} \left[\frac{C^{\text{UBQ}} \left(P_{h,t}^{\text{UB, ch}} + P_{h,t}^{\text{UB, dis}} \right)}{2S^{\text{UBN}}} + \frac{C^{\text{EVQ}} \left(P_{h,t}^{\text{EV, ch}} + P_{h,t}^{\text{EV, dis}} \right)}{2S^{\text{EVN}}} \right]$$
(31)

$$P_{h,t}^{\rm E} = \sum_{v=1}^{V} P_{h,v}^{\rm UR} + \sum_{w=1}^{W} P_{h,w}^{\rm CR} + P_{h,t}^{\rm EV,\,ch} - P_{h,t}^{\rm EV,\,dis} + P_{h,t}^{\rm UB,\,ch} - P_{h,t}^{\rm UB,\,dis}$$
(32)

其中, f^{UCost}、f^{BOCost}分别为耗能成本和电池老化成本; H为用户数; P^E_{h,i}为用户h的电负荷; H^{SP}为供能单价; P^{UB,ch}、P^{UB,dis}分别为用户侧蓄电池充、放电功率; P^{EV,ch}、P^{EV,dis}分别为电动汽车充、放电功率; C^{UBQ}、C^{EVQ} 分别为蓄电池、电动汽车的充放电循环成本; S^{UBN}、 S^{EVN}分别为蓄电池和电动汽车的额定容量; P^{LR}为用 户h第v个不可控负荷的用电功率; V为不可控负荷 的个数; P^{CR}_{h,w}为用户h第w个可控负荷的用电功率; W 为可控负荷的个数。

在进行优化时,电网希望用户的电负荷曲线尽量平坦,即尽可能降低电负荷峰谷差,缓减用电高峰压力。电负荷平坦度成本 *f*^{FLCost}为:

$$f^{\text{FLCost}} = \sum_{h=1}^{H} C^{\text{FL}} \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \left(P_{h,t}^{\text{E}} - \overline{P}_{h}^{\text{E}} \right)^{2} \right]$$
(33)

 $\overline{P}_{h}^{E} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} P_{h,t}^{E}$ (34)

其中,CFL为转化系数;P^E_h为电负荷均值。

综上,用户侧优化的综合目标函数为:

$$f^{\text{USERCost}} = a f^{\text{UCost}} + b f^{\text{BOCost}} + c f^{\text{FLCost}}$$
(35)

其中,a、b、c为各成本的权重因子。

2.4 供能单价

为将供能侧和用户侧相结合进行优化调度,引 入供能单价。供能单价*H*^{sr}的计算公式如下:

$$H_{t}^{\rm SP} = \frac{f_{t}^{\rm ENCost} + f_{t}^{\rm OMCost}}{Q_{t}^{\rm Enced} + Q_{t}^{\rm Cneed} + Q_{t}^{\rm Hneed}}$$
(36)

在未优化之前,根据用户习惯用能方式下冷热 电负荷的预测值,以及各时段 CCHP 系统购能成本 和设备运行维护成本的最小值,利用式(36)可以计 算得到用户习惯用能方式下的供能单价,即用户习 惯用能方式下负荷每单位耗能的成本。利用该供能 单价来指导用户侧进行优化,从而得到更为合理的 用户用能计划。根据优化后的用户侧冷热电负荷 值,对供能侧 CCHP 系统进行优化,得到优化后各设 备的出力及成本,利用式(36)计算得到优化后的供 能单价,从而计算得到优化后的用户侧成本。

3 算例分析

3.1 参数设置

某小区结构如图1所示,以夏季某日的优化运 行为例,热负荷只考虑热水热负荷,冷负荷考虑空间 冷负荷。冷热电负荷预测值见附录A图A1,光伏及 风电出力情况见附录A图A2的出力情况1,室外温 度及光照强度见附录A图A3。该小区中用户侧共 有100户家庭,分为2类:A类家庭50户,为白领家 庭,负荷主要集中在晚上;B类家庭50户,为老年人 家庭,白天与晚上均有一定程度的负荷。本文主要 考虑较为常见的几种负荷,且假设所有用户的家用 电动汽车和蓄电池均为同品牌同型号,所有家庭建 筑结构一致。次日,A类用户电动汽车有出行计划, 在08:00-09:00时段用户从家里出发前往工作地, 平均行驶速度为60 km / h,在17:00-18:00 时段用 户从工作地返回家中,平均行驶速度为60 km / h;B 类用户无出行计划。其他相关参数见附录A表 $A1 - A9_{\circ}$

3.2 结果分析

将一天划分为96个时段,每段时长15 min,利用Gurobi求解器在MATLAB/Yalmip环境中进行求解。计算得到优化前的供能单价如图4所示。可见供能单价在12:00和20:00左右达到峰值,在00:00时达到谷值。



图 4 供能单价 Fig.4 Unit price of energy supply

Fig.4 Onit price of energy suppry

利用该供能单价来指导用户侧进行优化,可得 到2类用户的负荷优化结果见附录B图B1和图B2。 图B1为A类用户优化后的负荷安排。由图B1可 知,洗碗机、洗衣机和扫地机器人的运行时间由原来 的晚间(供能单价峰时段)调度至清晨和下午(供能 单价平时段);抽油烟机和电饭锅为关联设备且时间 具有重叠性,优化后2个设备同时启停;烘干机和熨 斗为关联设备且具有先后运行顺序,优化后烘干机 在熨斗之前完成运行,符合用户需求。在00:00— 08:00时段,为满足用户出行需求,电动汽车一直充 电至08:00,电动汽车充满电。在08:00—09:00和 17:00—18:00时段,用户往返家里和工作地,电动汽 车消耗电量。18:00后用户回到家中,开始进行煮 饭、洗澡等活动,此时电负荷大且供能单价高,故电 动汽车被调度作为电源向其他家用电负荷供电,电 池电量进一步降低。图B2中,蓄电池与电动汽车均 于供能单价谷时段进行充电,于供能单价峰段放电。 2类用户室内温度和热水温度曲线见附录B图B3和 图B4,全天温度均满足用户需求。

将优化后的冷热电负荷实际值反馈至 CCHP系统,对 CCHP系统进行优化,得到系统各设备最佳出力。热、冷负荷平衡图分别如图 5 和图 6 所示,电负荷平衡图如附录 B 图 B5 所示。



图6 冷负荷平衡图

Fig.6 Balance diagram of cooling load

设置以下3种方案对比以验证所提模型的优越 性:方案1,供能侧采用CCHP系统进行综合供能,用 户侧不进行负荷优化调度,以冷热电负荷预测值计 算供能侧和用能侧的成本;方案2,供能侧采用冷热 电分供系统供能,燃气内燃机产生的余热不进行 回收,电制冷机和蓄冷设备供给冷负荷,燃气锅炉 和蓄热设备供给热负荷,用户侧进行负荷优化调度; 方案3,供能侧采用CCHP系统进行综合供能,用户 侧进行负荷优化调度,即本文所提模型。对上述3 种方案进行计算,得到各方案下的成本情况如表1 所示。

	表1	3种方案的成本比较
--	----	-----------

Table 1	Cost	comparison	among	three	cases
14010 1	0000	comparison	among	till ee	eaber

方案	供能侧 成本 / 元	用户侧 成本 / 元	电负荷平坦度 成本 / 元	环境 成本 / 元
1	3984.9247	5 192.473 9	1 173.468 3	304.2794
2	3873.5474	4 392.842 5	632.4729	375.3856
3	3745.8498	4101.6527	593.5503	323.3688

对比方案1和方案3,对用户侧进行优化调度 后,用户侧成本及电负荷平坦度成本急剧降低,说明 对用户负荷进行优化调度能有效降低电负荷峰谷差 和节约用户费用。虽然方案3的环境成本较方案1 稍高,但其双侧成本和电负荷峰谷差降低明显。对 比方案2和方案3,供能侧采用CCHP系统通过对多 种能源进行互补利用来为用户侧供能,能有效降低 双侧成本和电负荷峰谷差,减少环境污染。

为验证本文所提可再生能源就地消纳策略的有效性,分析光伏和风电在不同出力情况下的就地消纳率。在原有出力情况上新增2种风光出力情况,见附录A图A2中的出力情况2和出力情况3。计算得到不同出力情况下,有、无就地消纳策略时光伏及风电的就地消纳率如表2所示。

表2 3种出力情况 ⁻	下的就地消纳率
------------------------	---------

Tabl	e 2 On-site absorp	tion rate under
tl	nree kinds of output	t conditions
山力棲湿	光伏及风电的	就地消纳率 / %
山刀用几	无就地消纳策略	有就地消纳策略

99.57

99.31

98.35

96.39

<u>3</u>93.4299.04 由表2可知,随着光伏和风电出力的增大,其就 地消纳率增长变快,即可再生能源就地消纳策略的 效果变显著。随着可再生能源技术的发展,未来将 有越来越多的可再生能源接入系统,可再生能源就 地消纳策略将发挥越来越重要的作用。

4 结论

1 2

本文综合考虑供需双侧进行智能小区综合能源 日前优化调度研究。在供能侧,结合光伏发电、风力 发电以及 CCHP 系统来进行多种能源互补利用,提 出了增大光伏发电和风力发电就地消纳的控制策 略;在用户侧,将家用储能和电动汽车纳入考虑范 畴,对用户负荷进行精细分类和建模,充分分析了用 电设备频繁启停、电动汽车充放电及出行优化安排、 关联设备运行时间约束以及时间具有不可控性的冷 热负荷温度优化的问题。通过算例仿真分析,验证 了所提方法能有效降低电负荷峰谷差,节约用户费 用和减少环境污染。

随着可再生能源技术的迅速发展,系统中光伏、 风电等可再生能源的接入将不断增加,系统的不确 定性增大。此外,随着用户负荷的不断增加,负荷使 用的不确定性也将对系统优化结果造成一定的影 响。如何考虑和处理模型中的不确定性是笔者的下 一步研究方向。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

 [1] 郭彤荔. 浅析世界能源供需格局及中国能源清洁化策略[J]. 能源与节能,2019(11):25-28,73.
 GUO Tongli. Brief analysis of the world energy supply and demand pattern and China's energy cleaning strategy[J]. Ener24

gy and Energy Conservation, 2019(11):25-28,73.

[2] 王亚楠,吴杰康,毛晓明.基于随机动态规划的多能联供系 统冷热电经济分配模型[J].电力自动化设备,2019,39(6): 21-26.

WANG Yanan, WU Jiekang, MAO Xiaoming. Economic distribution model of cooling, heating and power energy in multienergy supply system based on stochastic dynamic programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 21-26.

- [3] 胡荣,马杰,李振坤,等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术,2017,41(2):418-425.
 HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology,2017,41(2):418-425.
- [4] ZHU Guangya, CHOW T. Design optimization and two-stage control strategy on combined cooling, heating and power system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199:111869.
- [5] WANG Qinghua, LIU Jizhen, HU Yang, et al. Optimal operation strategy of multi-energy complementary distributed CCHP system and its application on commercial building [J]. IEEE Access, 2019, 7: 127839-127849.
- [6] 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):6-12,29.
 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): 6-12,29.
- [7] 严毅,张承慧,李珂,等.含压缩空气储能的冷热电联供微网优 化运行策略[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6924-6936.
 YAN Yi,ZHANG Chenghui,LI Ke, et al. The optimal operation strategy for hybrid combined cooling, heating and power microgrid with compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6924-6936.
- [8] 傅质馨,李潇逸,朱俊澎,等.基于马尔科夫决策过程的家庭 能量管理智能优化策略[J].电力自动化设备,2020,40(7): 141-152.

FU Zhixin,LI Xiaoyi,ZHU Junpeng,et al. Intelligent optimization strategy of home energy management based on Markov decision process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(7):141-152.

- [9] 陈中,李云倩,冷钊莹,等.典型家用大功率负载精细化建模及 能量管理策略[J].电力系统自动化,2018,42(22):135-147.
 CHEN Zhong,LI Yunqian,LENG Zhaoying, et al. Refined modeling and energy management strategy of typical household high-power loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(22):135-147.
- [10] 曾博,蒋雯倩,杨舟,等.基于机会约束规划的家庭用电设备负荷优化调度方法[J].电力自动化设备,2018,38(9):27-33.
 ZENG Bo,JIANG Wenqian,YANG Zhou, et al. Optimal load dispatching method based on chance-constrained programming for household electrical equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):27-33.
- [11] 王珺,顾伟,张成龙,等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):89-97.
 WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control,2017,45(1):89-97.
- [12] 路红池,谢开贵,王学斌,等. 计及多能存储和综合需求响应 的多能源系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(8): 72-78.

LU Hongchi, XIE Kaigui, WANG Xuebin, et al. Reliability assessment of multi-energy system considering multi-storage and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):72-78.

[13] 张通,刘理峰,杨才明,等.考虑需求响应和风电不确定性的能源系统调度[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(8):1562-1571.

ZHANG Tong, LIU Lifeng, YANG Caiming, et al. Energy system scheduling considering demand response and wind power uncertainty [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(8): 1562-1571.

- [14] 张禹森,孔祥玉,孙博伟,等.基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J].电网技术,2018,42(6):1811-1819.
 ZHANG Yusen,KONG Xiangyu,SUN Bowei, et al. Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1811-1819.
- [15] 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.
- [16] 熊文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统 多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):118-126.
 XIONG Wen,LIU Yuquan,SU Wanhuang,et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):118-126.
- [17] 吴刚,刘俊勇,向月,等. 计及中长期合同电量分解和风电不确 定性的电-气综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设 备,2019,39(8):246-253.

WU Gang, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system with medium and long-term electricity contract decomposition and wind power uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):246-253.

- [18] KIKUSATO H, MORI K, YOSHIZAWA S, et al. Electric vehicle charge-discharge management for utilization of photovoltaic by coordination between home and grid energy management systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (3):3186-3197.
- [19] HUANG Yantai, WANG Lei, GUO Weian, et al. Chance constrained optimization in a home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(1):252-260.

作者简介:



蔡紫婷(1996—),女,广西贺州人,硕 士研究生,主要研究方向为综合能源系统 优化(**E-mail**:oosyi5@hnu.edu.cn);

彭敏放(1964—),女,湖南湘乡人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为电气设备监测诊断与评估、智能配电网 和智能信息处理(E-mail:pengminfang@hnu. edu.cn);

沈美娥(1966—),女,江苏苏州人,副教授,硕士,主要研 究方向为计算机仿真与建模、电路测试与智能信息处理 (E-mail:smelk@163.com)。

(编辑 李玮)

(下转第32页 continued on page 32)

Grounding fault section location method of distribution network based on adaptive clustering of similarities between energy spectra

YANG Gengjie¹, XU Ye², GAO Wei¹, HONG Cui¹, GUO Moufa¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Zhangzhou Electric Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China)

Abstract: The similarity characteristics of transient zero-sequence currents in each section of resonant grounding system during single-phase grounding fault are analyzed, based on which, a grounding fault section location method of distribution network based on adAP(adaptive Affinity Propagation clustering) of similarities between Hilbert instantaneous energy spectra is proposed. The first half power frequency cycle of the transient zero-sequence current in each section of faulty line is decomposed into waveforms of different frequency band by LCD(Local Characteristic-scale Decomposition). The Hilbert transform of the waveforms of different frequency band is carried out to obtain the Hilbert instantaneous energy spectra. The DTW(Dynamic Time Warping distance) between every two of Hilbert instantaneous energy spectra is calculated to construct the similarity matrix. Then the matrix is clustered by adAP algorithm, and the fault section is located by the largest Silhouette index. The simulation and field test results under the scenarios of arc fault, distributed arc suppression coil system, different compensation of arc suppression coil, noise interference, two-point grounding and asynchronous sampling show that the proposed method can accommodate to the underlying influencing situations in engineering application, and has good robustness and high accuracy.

Key words: resonant grounding system; grounding fault section location; transient zero-sequence current; local characteristic-scale decomposition; Hilbert instantaneous energy spectrum; dynamic time warping distance; adaptive affinity propagation clustering

(上接第24页 continued from page 24)

Day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities considering demand-side resources

CAI Ziting¹, PENG Minfang¹, SHEN Mei'e²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Computer Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the excessive consumption of fossil energy and the increasingly severe environmental pollution, the day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities combined energy supply side and demand side is studied, in which the utilization of demand-side resources are considered. On the supply side, a combined cooling, heating and power system with photovoltaic and wind power generation is demonstrated. A control strategy is proposed to increase the accommodation of local renewable energy considering the multi-energy complementary way. On the demand side, a refined load classification method is proposed, which considers the charging and discharging functions of household energy storages and electric vehicles, the frequent starting and stopping of electric equipment, travel scheme of electric vehicles, and operating time constraints of related equipment. Moreover, the operation decisions are analyzed for cooling and heating demands with uncontrollable running time. By introducing the unit price of energy supply, the supply side and demand side are combined to carry out the day-ahead optimal scheduling. Simulative results demonstrate that the proposed method can effectively reduce the cost of both supply and demand sides, the environmental pollution and the peak-valley difference of electric demands.

Key words: integrated energy; smart communities; combined cooling, heating and power; multi-energy complementary; demand response; day-ahead scheduling





Fig.A1 Forecasting values of cold, heat and electric load



图 A2 3 种光伏及风电出力情况









Table	Δ1	User	's hui	lding	dat

Table AT User's building data				
参数	数值			
建筑外墙面积/m ²	145			
建筑外墙传热系数/[W (m ² ·K) ⁻¹]	1.092			
窗户面积/m ²	45			
窗户传热系数/[W (m ² ·K) ⁻¹]	2.8			
遮阳系数	0.45			
热水供热系数/[W (L·K) ⁻¹]	1.16			

	•		
时段	购电电价/[元 (kW·h) ⁻¹] 售电电价/[元 (kW·h) ⁻¹]	天然气价格/[元 (kW·h) ⁻¹]
00:00—07:00 谷段	0.3438	0.2063	
07:00—10:00 平段	0.5713	0.3428	
10:00—13:00 峰段	0.8118	0.4871	0.25
13:00—17:00 平段	0.5713	0.3428	
17:00—22:00 峰段	0.8118	0.4871	
22:00—24:00 谷段	0.3438	0.2063	

表 A2 电价及天然气价格 Table A2 Electricity price and natural gas price

表 A3 3 种污染气体的排放系数及处理费用

Table A3 Emission factors and treatment costs of three pollutant gases

气体种类	烧煤时排放系数/[g (kW·h) ⁻¹]	燃烧天然气时排放系数/[g (kW·h)-] 处理费用/(元 kg ⁻¹)
CO_2	86.4725	49.0372	0.210
SO_2	1.9182	0.4641	14.843
NO _x	1.4696	0.7696	62.964

表 A4 2 类用户的日热水用量

Table A4 Hot water consumption for two types of users

単位: L/15 n

A 类			B 类
时间	热水用量	时间	热水用量
00:00—18:00	0	00:00-08:00	0
18:00-20:00	100	08:00—09:00	80
20:00-21:00	120	09:00—12:00	0
21:00-22:00	100	12:00—14:00	90
22:00-23:00	80	14:00—17:00	0
23:00-24:00	80	17:00-22:00	90
		22:00-24:00	0

表 A5 用户设备典型日数据 Table A5 Typical daily data of user equipment

	A类		B 类
设备名称	运行时间	设备名称	运行时间
电灯	18:00-24:00	电灯	18:00-22:00
洗碗机	20:00-22:00	电视机	09:00—17:00
电饭锅	18:00—19:00	电风扇	00:00-24:00
抽油烟机	18:15—19:15	电水壶	19:30—20:00
扫地机器人	19:00—21:00	电饭锅	17:00—18:00
烘干机	22:00-23:00	抽油烟机	17:15—18:15
洗衣机	21:00-22:00	烘干机	19:00-20:00
熨斗	23:00-23:30	熨斗	20:00-20:30

设备名称	功率/W	允许运行时间	使用时长/min	最大允许中 断次数	最小断电间隔 时间/min	关联性 设备
电灯*	150	18:00-24:00	360	-	-	-
洗碗机	400	00:00-18:00	120	0	0	-
电饭锅	600	18:00-20:00	60	0	0	抽油烟机
抽油烟机	200	18:00-20:00	60	0	0	电饭锅
扫地机器人	350	08:00-22:00	120	2	60	-
烘干机	1000	18:00-22:00	60	0	0	熨斗
洗衣机	340	08:00-18:00	60	0	0	-
熨斗	1200	18:00-22:00	30	0	0	烘干机
空间冷负荷	-		23±1°C (00:00—	08:00; 18:00—	24:00)	
生活热水	-		50±5°C(18:00-24:00)		
-	设备名称 电灯* 洗碗机 电饭锅 抽油烟机 扫地机器人 烘干机 洗衣机 熨斗 空间冷负荷 生活热水	设备名称 功率/W 电灯* 150 洗碗机 400 电饭锅 600 抽油烟机 200 扫地机器人 350 烘干机 1000 洗衣机 340 熨斗 1200 空间冷负荷 - 生活热水 -	设备名称功率/W允许运行时间电灯*15018:00—24:00洗碗机40000:00—18:00电饭锅60018:00—20:00抽油烟机20018:00—20:00扫地机器人35008:00—22:00烘干机100018:00—22:00洗衣机34008:00—18:00熨斗120018:00—22:00空间冷负荷-生活热水-	设备名称功率/W允许运行时间使用时长/min电灯*15018:00—24:00360洗碗机40000:00—18:00120电饭锅60018:00—20:0060抽油烟机20018:00—20:0060扫地机器人35008:00—22:00120烘干机100018:00—22:0060洗衣机34008:00—18:0060熨斗120018:00—22:0030空间冷负荷-23±1℃(00:00—生活热水-50±5℃(设备名称 功率/W 允许运行时间 使用时长/min 撮大允许中 断次数 电灯* 150 18:00—24:00 360 - 洗碗机 400 00:00—18:00 120 0 电饭锅 600 18:00—20:00 60 0 抽油烟机 200 18:00—20:00 60 0 打地机器人 350 08:00—22:00 120 2 烘干机 1000 18:00—22:00 60 0 洗衣机 340 08:00—18:00 60 0 熨斗 1200 18:00—22:00 30 0 空间冷负荷 - 23±1℃ (00:00—08:00; 18:00— 生活热水 - 50±5℃ (18:00—24:00)	设备名称 功率/W 允许运行时间 使用时长/min 撮大允许中 最小断电间隔 电灯* 150 18:00—24:00 360 - - 洗碗机 400 00:00—18:00 120 0 0 电饭锅 600 18:00—20:00 60 0 0 抽油烟机 200 18:00—20:00 60 0 0 打地机器人 350 08:00—22:00 120 2 60 烘干机 1000 18:00—22:00 60 0 0 洗衣机 340 08:00—18:00 60 0 0 熨斗 1200 18:00—22:00 60 0 0 熨斗 1200 18:00—22:00 30 0 0 熨斗 1200 18:00—22:00 30 0 0 空间冷负荷 - 23±1°C (00:00—08:00; 18:00—24:00) 1 1 生活熱水 - 50±5°C (18:00—24:00) 50±5°C (18:00—24:00) 1

表 A6 A 类用户负荷参数 Table A6 Load parameters for Class A users

注: "*"表示不可调度负荷,后同。

Table A7 Load parameters for Class B users								
负荷类型	设备名称	功率/W	允许运行时间	使用时长/min	最大允许中 断次数	最小断电间隔 时间/min	关联性 设备	
电负荷	电灯*	150	18:00-22:00	240	-	-	-	
	电视机*	180	09:00—17:00	480	-	-	-	
	电风扇*	120	00:00-24:00	1440	-	-	-	
	电水壶	1500	17:00-20:00	30	0	0	-	
	电饭锅	600	17:00—19:00	60	0	0	抽油烟机	
	抽油烟机	200	17:00—19:00	60	0	0	电饭锅	
	烘干机	1000	17:00-21:00	60	0	0	熨斗	
	熨斗	1200	17:00-21:00	30	0	0	烘干机	
冷负荷	空间冷负荷	-	32±1°C (08:00—19:00)					
热负荷	生活热水	-	50±5°C(08:00—22:00)					

表 A7 B 类用户负荷参数 Fable A7 Load parameters for Class B users

表 A8 家用电动汽车及蓄电池数据

Table A8 Data for home electric vehicle and battery							
设备 电池	山 洲 宏昌 //1-W/1-)	储电量上、下限/	充放电	最大充放电	电池自身能量损	每千米耗电量/	
	电他谷里/(кw·ш)	(kW·h)	效率	功率/kW	耗率	$(kW \cdot h \cdot km^{-1})$	
电动汽车	25	23.75 0	0.95	2.8	0	0.139	
蓄电池	3	2.7、0	0.95	1	0	-	

设备名称	参数	数值	设备名称	参数	数值
	运行效率	0.4		进冷量及释冷量上限/kW	200
燃气内燃机 运	出力上下限/kW	1000, 0		容量上限/(kW·h)	1000
	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.288	畜伶戉备	热损失系数	1
人共同此社界	热回收效率	0.8		支给 热损失系数 运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹] 进冷量及释冷量上限/kW 容量上限/(kW·h) 热损失系数 运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹] 充放电效率 最大充放电功率/kW	0.140
余热凹收装直	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.253			200
	发热效率	0.85	实由近友	容量上限/(kW·h)	1000
燃气锅炉	输出热功率上限/kW	500		热损失系数	1
	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.175		运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.175
	制冷系数	0.8		充放电效率	0.95
吸收式制冷机 ;	释冷量上限/kW	400		最大充放电功率/kW	22
	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.130		容量/(kW·h)	300
电制冷机	制冷系数	3	畜电池	自身能量损耗率	0
	释冷量上限/kW	600		储能量上下限/kW	270, 0
	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.300		运维成本系数/[元 (kW·h)-1]	0.380
光伏机组	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.337	风电机组	运维成本系数/[元 (kW·h) ⁻¹]	0.130

表 A9 CCHP 系统各设备参数 Table A9 Equipment parameters of CCHP system



Fig.B1 Optimized load arrangement for Class A users



Fig.B2 Optimized load arrangement for Class B users

