

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.013

## 家庭集聚需求侧响应策略分析

顾默<sup>1</sup>, 董树锋<sup>1</sup>, 张舒鹏<sup>1</sup>, 王海林<sup>2</sup>, 焦昊<sup>3</sup>, 陈锦铭<sup>3</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**在智能用电的背景下,家庭用户可通过参加电力需求响应促进电力系统的安全稳定和经济运行,并获得额外收益,据此文中提出了一种家庭集聚需求侧响应策略。首先,提出家庭集群化的理念,将居民家庭聚合为社区进行管理并设计居民侧的响应机制;其次,考虑需求响应时的居民用电习惯与影响因素,构建家庭用电的可响应负荷函数,对家庭的需求侧响应潜力进行量化,并在此基础上设计兼顾完成度和用户体验的家庭需求响应策略;最后,提出评价响应策略的3个具体指标,即任务完成率、用户不舒适度和经济效益,并用算例验证了所提策略的有效性和经济性。

**关键词:**需求侧响应;家庭集群化;用户体验;负荷管理;集中式储能;电力市场

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)04-0100-08

### 0 引言

随着电力市场化改革的稳步推进和智能电网布局的不断完善,增强电力系统稳定性和经济性的需求越来越迫切<sup>[1]</sup>。传统研究多从供给侧与需求侧2个方向出发,供给侧方向的研究在近些年已经走向成熟,而需求侧的有序用电和主动响应在电力系统领域正逐渐受到关注<sup>[2-4]</sup>。随着社会经济的发展,在需求侧中居民负荷所占比重逐渐提高,因此有必要研究居民负荷的需求响应策略。

目前国内外对居民负荷的研究主要侧重2个方面,其一是设计单个家庭的能源管理系统,其二是设计电网侧与居民侧的双向调节。前者着重于针对单户家庭的调节策略,如文献[5]设计的一种智能家庭能源管理系统,通过家庭与电网的充分互动,对家庭负荷进行管理,实现较为理想的需求侧响应,但存在各户家庭分别响应导致响应成本过高的问题;后者则通过电价调节或者激励任务,以降低电费、提高用户经济效益的方式吸引用户主动调节。文献[6]设想了一个完全自由的电力市场中需求侧应通过何种策略影响电价,从而引入了短期价格弹性这一概念,认为提高短期价格弹性将有助于改善电力市场运行状况;文献[7]提出了一种利用市场机制吸引需求侧负载并对其进行削减,以实现电网电力平衡的策略。以上研究均只考虑了经济效益,但基于居民负荷的自身特性、居民的用能体验,也应考虑集群化。文献[8]提出了社区再电

气化体系结构,通过对社区居民的分层集群化管理,聚焦于电热水器的控制以及用户意愿度的量化,以提高需求侧响应的效果,但并未针对其他电器进行分析;文献[9]分析了用户响应的行为分类及影响用户响应的因素等,但其主要方向是引入风机进行需求侧响应,并未对居民用户进一步分类处理;文献[10-13]则主要考虑分时背景下的需求响应,如针对空调负荷的需求响应、考虑用户行为不确定性的需求响应等。

因此,考虑到需求响应时的居民响应行为与影响因素,同时对社区居民进行集群化分析,文中从电网角度出发,提出家庭集聚需求侧响应策略。首先,基于将家庭按社区进行集群化管理的思想,设计了以社区为单位的家庭侧需求响应机制;其次,综合考虑响应效果和居民用能体验,提出了家庭的可响应负荷函数,实现了对社区负荷响应潜力的量化计算;然后,提出了基于响应机制和可响应负荷函数的负荷削减策略;最后,针对需求侧响应所要达成的目标,提出了衡量策略优劣的3个指标,并使用算例对所提策略进行了验证。

### 1 家庭集聚需求侧响应机制

居民侧的家庭负荷有以下3个特点:第一,单一家庭负荷的总量较小,相比工业和商业负荷,单一家庭负荷峰值在3~10 kW不等,若不形成规模效应,对完成需求侧响应任务的影响有限;第二,家庭成员对于用能体验的要求较高,电费降低、用能补贴对其吸引力较小,难以激发积极性;第三,单一家庭负荷的波动较大,由于总量较小,大功率电器的

收稿日期:2022-02-24;修回日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077193)

开启和关闭将极大影响功率曲线,因此难以在规定时间内完成任务。文中针对家庭负荷的以上特点,将居民家庭按社区进行集群化管理,以降低需求侧响应的实现难度,并通过加入集中式储能点提高响应效果<sup>[14]</sup>。

需求响应时居民侧与电网侧的双向交流如图1所示,绿色表示低耗能家庭,黄色表示中耗能家庭,红色表示高耗能家庭。首先,收集各户家庭中电器的实时耗电量,并计算出各家庭的实时功率曲线,利用智能开关、智能电表和非侵入式负荷检测技术可以完成这一步工作<sup>[15]</sup>;然后,根据实时功率曲线得到各家庭的实时可响应容量;最后,每个社区收集各家庭的可响应容量,得到本社区总的可响应容量,并将其汇报给电网,电网侧向居民侧社区下达响应任务。

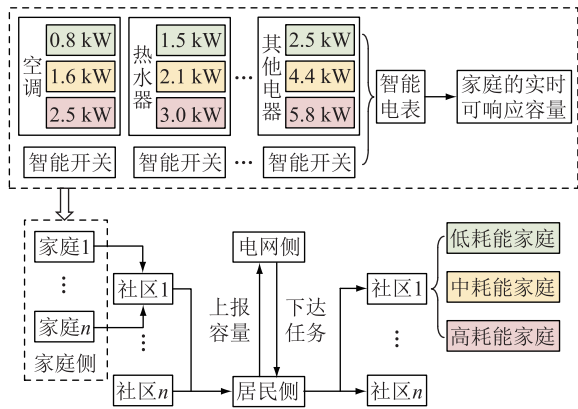


图1 居民侧与电网侧的双向交流流程

Fig.1 Flow chart of two-way communication between resident side and power grid side

家庭负荷的削减流程可以简要描述为:当居民侧接受任务后,会将负荷削减任务按家庭的类型分发给各居民用户,以充分发挥不同家庭的响应潜力。对于具体的某一户家庭,首先判断任务量是否大于该家庭的实时可响应容量,若任务量较大,则在削减居民用电量的基础上,选择通过社区集中式储能满足响应任务;若任务量小于实时可响应容量,则判断响应该任务是否会对居民的用电体验产生较大影响。若产生较大影响,则选择通过集中式储能点进行部分供电以兼顾任务完成与居民体验保护;若影响较小,则直接通过削减用电量完成任务。

综上所述,文中的响应机制共有三方参与:电网侧、居民侧与家庭侧。电网侧通过发布任务来实现平稳供电,削峰填谷,为此须付出储能点的建设成本、居民响应任务的奖励成本等。居民侧接受电网侧的任务,并将任务下发给各个家庭,可以将居民侧作为一个负荷聚合商,其本身并不注重收益,

仅作为一个中转存在。家庭侧在综合经济效益和舒适度的基础上,对任务进行响应。

## 2 单个家庭实时可响应负荷函数

为量化用户的负荷削减潜力,定义可响应负荷为在保证用户用能体验的前提下,家庭在较短时间内(如15 min)能够削减的功率总量。实时可响应负荷函数以时间作为横轴,反映1 d任意时刻的可削减负荷量。通常在家庭主要用电设备中,考虑到用户舒适度的需要,将冰箱、电磁炉等刚性负荷排除;考虑到功率大小,将电灯等低耗能电器排除。因此文中的实时可响应负荷函数仅考虑空调、热水器、烘干机、洗衣机、洗碗机这5类电器。

由于家庭需求侧响应的自身特点,可响应负荷函数的构造必须综合考虑家电的特性、用户的舒适度以及用电习惯。设实时可响应负荷为 $Q$ ,则 $Q$ 可表示为:

$$Q = \sum_{x=1}^5 \alpha_x P_x \quad (1)$$

式中: $\alpha_x$ 为电器 $x$ 输出功率的可削减比例; $P_x$ 为电器 $x$ 的输出功率。各电器分析参数如下。

(1) 空调的可削减比例 $\alpha_1$ 。

$$\alpha_1 = \tau \beta \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为居民的温差耐受; $\beta$ 为家庭意愿度。

根据实际问卷调查数据,温差耐受 $\tau$ 可用分段函数表示为:

$$\tau = \begin{cases} 1 & T_{\text{diff}} \leq T_{\text{low}} \\ 1 - T_{\text{diff}}/10 & T_{\text{low}} < T_{\text{diff}} < T_{\text{high}} \\ 0.2 & T_{\text{diff}} \geq T_{\text{high}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{diff}}$ 为室外温度与人体舒适温度间的温差; $T_{\text{low}}$ , $T_{\text{high}}$ 为影响用户削减空调负荷意愿的温差阈值。文献[16]表明,在室内条件下自然着装时,用户可接受的温度范围为15.4~28.4℃。

家庭意愿度 $\beta$ 是与家庭类型有关的经验常数。一般可按耗能高低对社区家庭进行分类。响应意愿较弱的家庭中,低耗能和高耗能家庭较多,中耗能家庭则较少。这是由于低耗能家庭的电器功耗已经降到其舒适度可以忍耐的下限;而对于高耗能家庭,相比响应任务,自身舒适度更为重要。因此根据实际问卷调查数据, $\beta$ 可表示为:

$$\beta = \begin{cases} 0.6 & P_{\text{con}} \leq P_{\text{low}} \\ 0.8 & P_{\text{low}} < P_{\text{con}} < P_{\text{high}} \\ 0.6 & P_{\text{con}} \geq P_{\text{high}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{low}}$ , $P_{\text{high}}$ 为区分低耗能家庭、中耗能家庭和高耗能家庭类型的耗能阈值; $P_{\text{con}}$ 为家庭的月耗能。

(2) 热水器的可削减比例  $\alpha_2$ 。

$$\alpha_2 = \mu\beta \quad (5)$$

式中： $\mu$  为缺水耐受，是一个与时间  $t$  有关的函数。在 07:00—08:00 和 13:00—15:00 期间，热水器用水需求较小， $\mu$  的值较大；而在 19:00—24:00 期间，由于洗浴时减少热水器的功率将极大降低用户体验， $\mu$  的值较小。因此根据实际调查数据， $\mu$  可表示为：

$$\mu = \begin{cases} 0.8 & 07:00-08:00 \\ 0.9 & 13:00-15:00 \\ 0.5 & 19:00-24:00 \end{cases} \quad (6)$$

(3) 烘干机、洗衣机、洗碗机的可削减比例  $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 。考虑到烘干机、洗衣机、洗碗机具有灵活调度的特性，且对用户舒适度的影响微乎其微，因此这 3 种电器的可削减比例只与用户的家庭意愿度有关，可表示为：

$$\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \beta \quad (7)$$

综上所述可知，建立每户家庭的响应负荷模型所需的数据为电器的实时功率以及该户家庭的部分用电习惯。

### 3 家庭集聚需求侧响应策略及评价指标

#### 3.1 需求侧响应策略

储能技术在电力系统中的广泛应用是未来电网发展的必然趋势<sup>[17-19]</sup>。随着电化学储能成本的不断降低以及技术的不断发展，在各社区建立利用梯次储能技术的储能点将是可行的<sup>[20-21]</sup>。因此，文中的需求响应策略设置各家庭可从社区内的集中式储能点认购一定量的能源储备。当任务完成度较低或响应任务导致电器功率削减过多时，可以通过集中式储能点进行供电，提高用户的用能体验和任务完成度；当未分配任务且当前处于低谷电价时，储能点自动充电。

文中在设计需求侧响应策略时，以分时电价为背景。电网为社区分配需求侧响应任务的公式为：

$$\begin{cases} q_{j,t} = \left( \sum_{i=1}^M C_{i,j,t} / W_t \right) Q_{\text{task},t} \\ C_{i,j,t} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n c_{m,i,j,t} \\ W_t = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M C_{i,j,t} \\ Q_{\text{task},t} = \lambda W_t \end{cases} \quad (8)$$

式中： $c_{m,i,j,t}$  为第  $j$  个社区第  $i$  户家庭在过去第  $m$  天  $t$  时刻的可响应负荷； $C_{i,j,t}$  为根据第  $j$  个社区第  $i$  户家庭过去  $n$  天的用能习惯所预测的在  $t$  时刻的可响应

负荷； $W_t$  为所有社区家庭在  $t$  时刻的总可响应负荷； $N$  为社区总数； $M$  为社区中的家庭数； $Q_{\text{task},t}$  为  $t$  时刻总的响应任务； $\lambda$  为响应裕度，以防止响应完成率过低； $q_{j,t}$  为在  $t$  时刻分配给第  $j$  个社区的响应任务。

社区为家庭分配任务的公式为：

$$q'_{i,j,t} = \frac{C_{i,j,t}}{\sum_{i=1}^M C_{i,j,t}} q_{j,t} \quad (9)$$

式中： $q'_{i,j,t}$  为  $t$  时刻第  $j$  个社区为第  $i$  户家庭分配的负荷削减量。

该户家庭响应任务的公式为：

$$q'' = \sum S_{L_n, q'} P_{L_n} \quad (10)$$

$$S_{L_n, q''} = \begin{cases} 1 & q'' < q'; P_{L_n} > 0 \\ 0 & q'' \geq q'; P_{L_n} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： $L_n$  为事先规定的家电优先级，按优先级由低到高依次削减家电功率，直至任务完成； $P_{L_n}$  为第  $L_n$  优先级的电器的可削减负荷； $S_{L_n, q'}$  为第  $L_n$  优先级的电器开关函数，当该户家庭的  $P_{L_n} > 0$  且仍未完成响应任务时，取值为 1，否则取值为 0； $q'$  为该户家庭已削减的负荷； $q''$  为响应任务要求的负荷。

该户家庭利用储能点供电的判定公式为：

$$S_{q''} = \begin{cases} 1 & q'' < q''_e \\ 0 & q'' \geq q''_e \end{cases} \quad (12)$$

式中： $S_{q''}$  为储能点供电的开关函数，其值为 1 表示利用储能点供电，为 0 表示不利用储能点供电； $q''_e$  为未启用集中式储能点供能时该家庭总的可削减负荷量。

#### 3.2 需求侧响应策略的评价指标

社区需求侧响应的目标应着力解决 3 个问题：完成需求侧响应任务、保护用户体验、提高用户经济效益。据此分别提出 3 个指标，以量化居民侧需求响应策略的优劣。

(1) 完成率。完成率用来描述一个社区完成需求侧响应任务的程度。完成率越高，说明削减功率越多，该社区的响应效果越好。设置完成率  $\gamma$  为：

$$\begin{cases} \gamma = Q_f / Q_{\text{task}} \\ Q_f = \sum \int_{t_1}^{t_2} P dt \\ Q_{\text{task}} = P_{\text{task}} (t_2 - t_1) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $Q_f$  为响应时段内某个社区全部家庭的总削减容量； $Q_{\text{task}}$  为响应任务要求的响应容量； $t_1, t_2$  分别为响应任务的开始和结束时刻； $P$  为响应时段内某时刻某家庭的削减功率，由于实时削减功率会发生变化，因此需要积分确定某家庭一段时间内的总削减

量; $P_{\text{task}}$ 为响应任务要求的总削减功率。

(2) 用户不舒适度。定义用户不舒适度为一个反映因要求削减电器功率而给用户带来不适感的量,其与电器优先级相关。对优先级高的电器进行功率削减或关闭会导致用户强烈不适,而对优先级较低的电器进行功率削减或关闭则对用户的舒适感影响甚少。可削减负荷对不适度的影响与削减量的大小成正比,可转移负荷对不适度的影响则只考虑开关状态。设置不舒适度 $\varphi$ 为:

$$\varphi = \sum_{k=1}^s \delta_k \frac{\Delta P_{ck}}{P_{ck}} + \sum_{l=1}^L \varepsilon_l S_l \quad (14)$$

式中: $s$ 为可削减负荷数量; $L$ 为可转移负荷数量; $\delta_k, \varepsilon_l$ 分别为可削减负荷 $k$ 和可转移负荷 $l$ 的不舒适度影响系数,二者均为经验常数,与社区家庭类型、用能习惯有关,可根据实际调研获取; $\Delta P_{ck}$ 为可削减负荷 $k$ 的削减量; $P_{ck}$ 为可削减负荷的额定功率; $S_l$ 为可转移负荷 $l$ 的开关状态函数。

(3) 经济效益。经济效益主要由两方面组成,其一是电费下降,主要通过功率削减、功率转移以及储能点供电代替电网供电实现;其二是经济奖励,主要通过完成响应任务实现。设置经济效益 $\omega$ 为:

$$\begin{cases} \omega = \omega_1 + \omega_2 \\ \omega_1 = P_{\text{rice}}(t) \Delta Q - P_{\text{rice,low}} \Delta Q_{S1} - P_{\text{rice,S}} \Delta Q_{S2} \\ \omega_2 = \rho \Delta Q \end{cases} \quad (15)$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 & \Delta Q/Q_0 \geq Q_a \\ \rho_2 & Q_b < \Delta Q/Q_0 < Q_a \\ 0 & \Delta Q/Q_0 \leq Q_b \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\omega_1$ 为电费下降的经济效益; $\omega_2$ 为完成响应任务带来的经济效益; $P_{\text{rice}}(t)$ 为 $t$ 时刻的分时电价; $P_{\text{rice,low}}$ 为在峰谷电价下的低谷电价; $P_{\text{rice,S}}$ 为储能点供电时的电价; $\Delta Q$ 为实际负荷削减量; $\Delta Q_{S1}$ 为实际负荷转移量; $\Delta Q_{S2}$ 为实际储能点供电量; $Q_0$ 为任务要求削减量; $\rho$ 为奖励系数,与任务完成率 $\Delta Q/Q_0$ 有关; $Q_a, Q_b$ 为任务完成率的阈值。

## 4 算例分析

### 4.1 算例设计

对于家用电器的数学模型构建,算例使用基于Matlab的Smart Residential Load Simulator (SRLS)工具箱<sup>[22]</sup>。文中通过调查问卷的形式收集家庭用电数据,将问卷所得的4 000户家庭作为一个社区进行分析,按耗能高低设置低、中、高耗能家庭比例为1:2:1,相关信息如表1所示。

表1 各家庭的电器信息

Table 1 Household electrical appliances information kW

电器信息	低耗能家庭	中耗能家庭	高耗能家庭
空调功率	0.8	1.6	2.5
热水器功率	1.5	2.1	3
洗衣机功率	0.5	1.2	1.8
洗碗机功率	0.5	1.2	1.5
烘干机功率	1.5	2	2.5
理论峰值功率	4.8	8.1	11.3

需求侧响应任务削减量的设置参考式(8),家庭用户的可响应容量一般占实时总功率的20%~40%。根据表1,为简化计算,且考虑到响应裕度,对总理论峰值功率为32 300 kW的社区,设置响应任务量为7 300 kW,持续时段为13:00—16:00。

在集中式储能方面,为满足削峰填谷需要,同时简化计算,根据该社区的峰谷负荷差值设置3类家庭均认购1.5 kW·h储能容量,输出功率最大为500 W。电价参照浙江省2017年电价表,即峰值电价为0.568元/(kW·h),谷值电价为0.288元/(kW·h)。储能点供电电价参考光伏电价,设置为0.5元/(kW·h)<sup>[23]</sup>。考虑到需要储能点供电的时刻一般电价处于峰值,因此该价格较为适合。

在不舒适度影响系数方面,文中通过问卷调查将5类电器对用户舒适度的影响程度按从1~5由小到大量化,空调、热水器、烘干机、洗衣机、洗碗机的不舒适度影响系数分别为5、1、2、1.5、1.5。

在经济补贴方面,当完成率在0.75~1时,补贴单价为2元/(kW·h);当完成率在0.25~0.75时,补贴单价为0.8元/(kW·h);当完成率在0~0.25时,补贴单价为0。

### 4.2 策略对比

文中通过算例验证3种策略的效果,3种策略分别为传统的削减策略(策略1)<sup>[24]</sup>、考虑可响应负荷的削减策略(策略2)以及文中提出的策略。策略1主要根据基线负荷<sup>[25]</sup>确定各户家庭的削减量,不考虑家电削减的优先级,为现在常见的策略;策略2则在策略1的基础上考虑可响应负荷函数。

以1户低耗能家庭为例,对比3种策略的差异,如图2所示。图2(a)为未削减时的实时耗能,图2(b)、图2(c)和图2(d)分别为策略1、2和文中策略的响应情况。

策略1对该低耗能家庭分配1.8 kW任务。在13:00—14:00,任务完成率较高,主要由于洗衣机被关闭,但此时任务仍未完成,因此空调功率被降低;在14:00—15:00,任务完成率较低,由于该家庭在

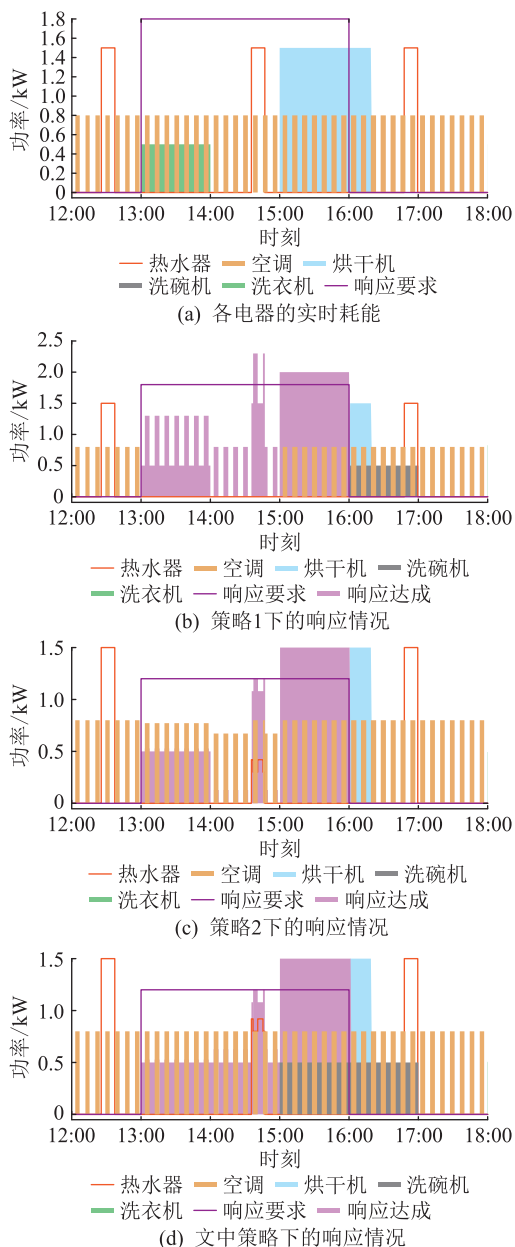


图2 低耗能家庭在3种策略下的效果  
Fig.2 Effect of a low energy cost family under three strategies

该时段仅有空调工作,为完成任务,不得不大幅降低空调功率,从而对用户体​​验造成极大影响;在15:00—16:00,任务完成率极高,甚至大幅超过了响应要求。分析可得,该时段烘干机、洗碗机均被关闭。由于缺乏电器关闭策略,用户无法得知该家庭已削减功率的大小,因此只好尽可能关闭电器,从而超额完成任务。尽管任务完成率较高,但是电器的超额关闭导致用户体验极大下降。

策略2对该低耗能家庭分配1.2 kW任务并引入了文中所提的可响应负荷函数。对于某户家庭,若其削减功率大小已达可响应负荷的上限,却仍未完成任务,则不再削减功率,此时若再削减功率,边

际效益将会递减。由图2(c)可知,由于可响应负荷函数的影响,在13:00—15:00削减量减少,主要因为空调不再被削减,用户体验得到了较高的提升,但任务完成率和策略1相比下降明显。

相比于策略1、2,文中策略的完成率较高,用户不舒适度较低,如图2(d)所示,主要因为集中式储能点的供能。当整体任务完成率较低时,可以选择从电网供电转向利用储能点供电,提高削减比例。另外,对于响应任务导致用户体验大幅下降的时刻,利用储能点供电可以提高其体验。集中式储能点供能的主要时段为14:00—15:00,完成率由几乎为0提高到近0.5。

3种策略总的削减情况见图3。由图3可知,策略1的完成率极高,几乎完成了所分配的任务,大多数时段削减功率在6~8 kW,仅在14:00大幅下降;策略2在14:00—16:00的削减功率有一个大的下降,任务完成率相比于策略1有明显降低,这是由于可响应负荷函数的限制;文中策略在14:00—16:00削减功率重新上升,这部分的增加主要是集中式储能点参与的结果。文中策略可得到较为稳定的负荷削减量,这是其他策略所不具备的优势。

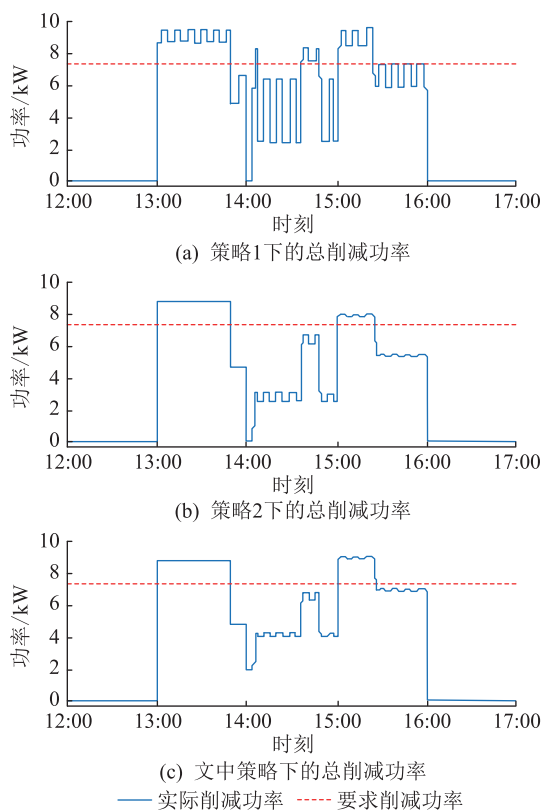


图3 家庭集群在3种策略下的总削减功率  
Fig.3 Total power reduction of family clusters under three strategies

表2综合比较了3种策略指标,可见,策略1的完成率达到了0.964,但对家庭用能体验的破坏过于

严重,例如低耗能用户的不适度达到了 9.2;策略 2 兼顾了完成率和用户体验,以低耗能家庭为例,用户不适度由 9.2 降低到 4.2,同时对于不同完成率的用户,其补贴区分更为明显。文中策略在策略 2 的基础上进一步提高了用户体验和任务完成率,其 3 个指标的综合表现最佳,验证了文中策略的有效性。

表 2 3 种策略的指标汇总

Table 2 A summary of indicators of three strategies

策略	$\gamma$	低耗能用户		中耗能用户			高耗能用户			
		$\varphi$	$\omega_1/\omega_2/\text{元}$	$\varphi$	$\omega_1/\omega_2/\text{元}$	$\varphi$	$\omega_1/\omega_2/\text{元}$	$\varphi$	$\omega_1/\omega_2/\text{元}$	
策略 1	0.964	9.2	0.9	3.8	8.3	1.6	12.0	5.3	1.5	15.0
策略 2	0.809	4.2	0.4	2.2	6.0	0.9	9.9	5.8	1.6	15.0
文中策略	0.918	3.7	0.3	1.7	5.6	0.9	11.0	5.6	1.6	15.0

从用户角度看,策略 1 所节约的电费最多,其补贴力度也最大,对用户的收益最高,但对用户的体验破坏也是最大的。策略 2 节约电费最少,其补贴力度明显减弱,收益降低幅度较大。相比于策略 1、策略 2,文中策略略微降低了节约电费带来的收益,且对补贴力度有一定提升。

从电网角度看,不同需求侧响应策略的成本不同。策略 1 和策略 2 的成本主要是补贴成本,文中策略一定程度上降低了补贴,但需要额外的储能成本。考虑到储能技术的不断成熟,储能成本将不断下降,同时考虑利用储能点提供更多服务,如允许用户在停电时从储能点购电自用等也可降低储能成本,因此从长远来看,文中策略有更好的可持续性。

## 5 结论

为充分发掘家庭侧的需求响应潜力,文中提出一种家庭集聚需求侧响应策略,主要有以下结论:

(1) 文中基于家庭用户集群化管理的思路,提出了以社区为单位的家庭侧需求响应机制,解决了单一家庭可削减量较少、响应困难的问题,提高了将居民侧纳入需求侧响应的可行性。

(2) 针对家庭侧用电设备的多样性以及不同家庭对用电量削减的敏感度不同,文中提出了可响应负荷函数。该函数兼顾电器特性、环境因素和用户体验,可实时反映家庭的可削减负荷量,从而量化各户家庭的响应潜力。

(3) 传统策略针对的对象为工业用户和商业用户,其对舒适度并不敏感,因此不能直接应用于对

居民的需求侧响应任务。文中提出的家庭负荷削减策略能够兼顾任务完成率、用户不适度和经济效益 3 个指标,相比传统策略,更加注重对用户体验的保护,提高了用户参与响应的积极性。

在未来的研究中,将对社区集中式储能点的盈利方式、优化配置和控制策略展开进一步研究。

## 参考文献:

- [1] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1): 18-28.
- [2] 李彬,陈京生,李德智,等. 我国实施大规模需求响应的关键问题剖析与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 694-704.  
LI Bin, CHEN Jingsheng, LI Dezhi, et al. Analysis and prospect of key issues in China's demand response for further large scale implementation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 694-704.
- [3] 张钦,王锡凡,付敏,等. 需求响应视角下的智能电网[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 49-55.  
ZHANG Qin, WANG Xifan, FU Min, et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 49-55.
- [4] 王宝,叶斌,朱刘柱,等. 市场环境下我国电力需求响应实践与探索[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 91-95.  
WANG Bao, YE Bin, ZHU Liuzhu, et al. Practice and exploration of China's power demand response in electricity market[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 91-95.
- [5] 金森钧. 基于分布式发电和储能的家庭能量管理系统设计与优化调度算法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.  
JIN Senjun. Research on design and optimal scheduling algorithm of home energy management system based on distributed generation and energy storage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [6] KIRSCHEN D S. Demand-side view of electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 520-527.
- [7] HAO H, CORBIN C D, KALSI K, et al. Transactive control of commercial buildings for demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 774-783.
- [8] 姜英涵. 智慧社区电热水器类温控负荷需求响应控制策略研究[D]. 天津:天津大学, 2018.  
JIANG Yinghan. Research on demand response control strategy for TCLs of DEWH type in smart community [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [9] 龙明溪. 考虑新能源并网的智能社区居民负荷优化调度研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.  
LONG Mingxi. Research on load optimal scheduling of residents in smart community considering new energy [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [10] 马骏超,黄弘扬,楼伯良,等. 分时电价背景下综合能源需求响应优化建模[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 99-106.  
MA Junchao, HUANG Hongyang, LOU Boliang, et al. Optimal modeling of integrated energy demand response under time-shared electricity price[J]. Electric Power Engineering Tech-

- nology, 2020, 39(5):99-106.
- [11] 杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15):132-140.  
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15):132-140.
- [12] 王尧, 谭彩霞, 王佳伟, 等. 分时电价机制下计及用户需求响应的微网优化调度模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(10):9-15.  
WANG Yao, TAN Caixia, WANG Jiawei, et al. Micro-grid optimization scheduling model considering user demand response under time-of-use electricity price mechanism[J]. Smart Power, 2020, 48(10):9-15.
- [13] 王韵楚, 张智, 卢峰, 等. 考虑用户行为不确定性的阶梯式需求响应激励机制[J/OL]. 电力系统自动化: 1-11 [2022-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220415.1651.008.html>.  
WANG Yunchu, ZHANG Zhi, LU Feng, et al. Stepwise incentive mechanism of demand response considering uncertainty of user behaviors[J]. Automation of Electric Power Systems: 1-11 [2022-05-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220415.1651.008.html>.
- [14] 杨少布道, 陈乐乐, 李波. 集中式储能下微电网控制策略研究[J]. 供用电, 2021, 38(6):21-28.  
YANG Shaobudao, CHEN Lele, LI Bo. Research on control strategy of microgrid under centralized energy storage[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6):21-28.
- [15] CHEN K J, ZHANG Y, WANG Q, et al. Scale- and context-aware convolutional non-intrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3):2362-2373.
- [16] 宋梦, 高赐威, 苏卫华. 面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14):158-167.  
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):158-167.
- [17] 叶季蕾, 薛金花, 王伟, 等. 储能技术在电力系统中的应用现状与前景[J]. 中国电力, 2014, 47(3):1-5.  
YE Jilei, XUE Jinhua, WANG Wei, et al. Application of energy storage technology and its prospect in power system[J]. Electric Power, 2014, 47(3):1-5.
- [18] 王辉, 梁登香, 韩晓娟. 储能参与泛在电力物联网辅助服务应用综述[J]. 发电技术, 2021, 42(2):171-179.  
WANG Hui, LIANG Dengxiang, HAN Xiaojuan. Reviews of energy storage participating in auxiliary services under ubiquitous Internet of Things[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2):171-179.
- [19] 李建林, 牛萌, 王上行, 等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2):28-35.  
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):28-35.
- [20] 田壁源, 常喜强, 张新燕, 等. 考虑需求响应和共享储能的配电网低碳经济调度[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5):52-56.  
TIAN Biyuan, CHANG Xiqiang, ZHANG Xinyan, et al. Low carbon economic dispatch of distribution network considering DR and shared energy storage[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5):52-56.
- [21] 赵伟, 袁锡莲, 周宜行, 等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12):16-24.  
ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12):16-24.
- [22] LÓPEZ J M G, POURESMAEIL E, CAÑIZARES C A, et al. Smart residential load simulator for energy management in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2):1443-1452.
- [23] 清雅. 光伏储能销售电价低至 0.5~0.8 元/(kW·h) [EB/OL]. [2022-05-05]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/2019-0129/959921.shtml>.  
QING Zhi. The selling price of photovoltaic energy storage is as low as 0.5~0.8 yuan/(kW·h) [EB/OL]. [2022-05-05]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20190129/959921.shtml>.
- [24] 江苏省经信委. 江苏省电力需求响应实施细则 [EB/OL]. [2022-05-05]. [http://gxt.jiangsu.gov.cn/art/2015/6/25/art\\_6299\\_3030239.html](http://gxt.jiangsu.gov.cn/art/2015/6/25/art_6299_3030239.html).  
Jiangsu Economic and Information Commission. Implementation rules for demand response [EB/OL]. [2022-05-05]. [http://gxt.jiangsu.gov.cn/art/2015/6/25/art\\_6299\\_3030239.html](http://gxt.jiangsu.gov.cn/art/2015/6/25/art_6299_3030239.html).
- [25] 林琳, 高雪, 甄钊. 居民用户的需求响应基线负荷估计[J]. 电气自动化, 2022, 44(1):63-66.  
LIN Lin, GAO Xue, ZHEN Zhao. Demand response baseline load estimation for residential users[J]. Electrical Automation, 2022, 44(1):63-66.

作者简介:



顾默

顾默(1996),男,硕士在读,研究方向为需求侧响应和电力市场(E-mail:gumo@zju.edu.cn);

董树锋(1982),男,博士,副教授,研究方向为输配一体化电网分析、配电网建模和分析;

张舒鹏(1996),男,硕士在读,研究方向为储能调频和电力市场。

## A strategy for demand response based on family agglomeration

GU Mo<sup>1</sup>, DONG Shufeng<sup>1</sup>, ZHANG Shupeng<sup>1</sup>, WANG Hailin<sup>2</sup>, JIAO Hao<sup>3</sup>, CHEN Jinming<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In the context of intelligent power consumption, household users can promote the safe, stable and economic operation of the power system by participating in electricity demand response and obtain additional benefits. Therefore, a strategy for demand response based on family agglomeration is proposed in this paper. Firstly, the concept of family clustering is proposed to manage the aggregation of residents' families into communities and to design the response mechanism on the residents' side. Secondly, considering the residents' electricity consumption habits and influencing factors during demand response, the responding load function of household electricity consumption is constructed, which quantifies the potential of household demand response. On this basis, a response strategy is designed which takes both the degree of completion and user experience into account. Finally, three specific indicators are proposed to evaluate the response strategy, namely task completion rate, user discomfort and economic benefits. An example is given to verify the effectiveness and economy of the proposed strategy.

**Keywords:** demand response; family clustering; user experience; load management; centralized energy storage; electricity market

(编辑 陆海霞)

(上接第 24 页)

## Frequency support capacity of asynchronous motor and its equivalent inertia evaluation

ZHOU Tao<sup>1</sup>, LIU Zicheng<sup>1</sup>, CHEN Zhong<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>3</sup>, XU Yan<sup>4</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nari Group Corporation, Nanjing 211106, China;

4. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The new power system is gradually evolving into a low inertia power system with high penetration of DC and new energy, and the inertia of the load side is gradually increasing. Asynchronous motors occupy a high proportion in the load side, and their frequency support function needs further research. In order to evaluate the equivalent inertia of asynchronous motor under inertial time scale, a small signal model of asynchronous motor is established in electromechanical transient state. The transfer function of asynchronous motor power consumption and system frequency deviation is inferred in this paper. At the same time, the effective inertia of asynchronous motor to power system is inferred and the time-varying characteristics of asynchronous motor to power grid is analyzed. According to the idea of frequency support capability in inertia response stage, the factors which affect inertia frequency response of asynchronous motor are analyzed. The equivalent inertia evaluation model of asynchronous motor is proposed to quantify the frequency support capacity of dynamic load. Finally, a simulation model is built on Matlab/Simulink and PSASP platform to verify the correctness and effectiveness of the evaluation model and method proposed in this paper.

**Keywords:** asynchronous motor; inertial response; frequency stability; equivalent inertia; power balance; inertia assessment

(编辑 方晶)