

一种小微负荷智能监测与聚合分析系统研究

王异成¹, 罗华峰², 马骏超², 陆承宇², 张宝¹, 彭琰²

(1. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310012;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 用户小微负荷资源众多、容量丰富、分布不均, 可与电网进行双向互动。为打通电网公司与用户的精细化友好互动通道, 实现用户侧小微负荷需求响应资源充分利用, 构建了一种小微负荷智能监测与聚合分析系统。首先考虑用户功率、电流等特征差异, 提出基于马氏距离相似度匹配的小微负荷构成非侵入式监测方法, 实现小微负荷的细粒度监测; 然后考虑小微负荷的物理特性和响应原理不同, 提出基于用户舒适度指标的小微负荷需求响应能力分级聚合方法, 实现小微负荷响应能力评估; 最后, 在某小微负荷智能监测与聚合分析系统对所提方法进行实际测试, 结果表明, 该系统能较好地小微负荷进行细粒度监测以及聚合分析与控制, 可为后续更深层次研究提供测试平台。

关键词: 负荷监测; 聚合评估; 负荷控制

文章编号: 1007-1881(2021)12-0037-09

DOI: 10.19585/j.zjdl.202112005

中图分类号: TM714

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Smart Monitoring and Aggregate Analysis System for Small and Micro Loads

WANG Yicheng¹, LUO Huafeng², MA Junchao², LU Chengyu², ZHANG Bao¹, PENG Yan²

(1. E.Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Featuring multiple resources, rich capacity and uneven distribution, small and micro loads of users can interact with power grids bidirectionally. In order to get through the fine and friendly interaction channel between power grid enterprises and users and make full use of user-side small and micro load demand response resources, a smart monitoring and aggregate analysis system for small and micro load is constructed. Firstly, characteristic differences of power and current are considered, and a non-intrusive monitoring method based on Mahalanobis distance similarity matching is proposed to realize the fine-grained monitoring of small and micro loads; then, the different physical characteristics and response principles of small and micro load are considered, and a hierarchical aggregation method of small and micro load demand response capability based on user comfort index is proposed to realize the evaluation of small and micro load response capability; finally, the proposed method is tested in the small and micro load smart monitoring and aggregate analysis system. The results show that the system is superior in fine-grained monitoring and aggregate analysis and control over small and micro loads, which provides a test platform for further research.

Keywords: load monitoring; aggregate assessment; load control

0 引言

随着能源互联网^[1]建设的逐步推进, 在电力供给侧, 可再生能源接入电网的渗透率逐步提高。该现状导致以火电为代表的传统可调节资源不断被压缩, 使得电力供给侧保障电网安全运行的可调节性能显著降低。负荷侧灵活性资源具有

调节灵活、容量充足、潜力巨大^[2]等优点。伴随着“碳达峰、碳中和”目标的提出及其行动的推进, 需要在电力需求侧有效挖掘系统的灵活性负荷资源^[3]的调节潜力。

由于居民等常规负荷资源单个容量较小, 数量众多, 时间、空间等分布随机性较强, 直接参与电力批发市场组织管理成本较高。随着现代信

息技术的发展,通过引入小微负荷聚合商,使用电力物联网技术对居民小微负荷的运行状态与功率实施非侵入式监测、聚合与功率控制^[4],不仅可以提高对小微负荷的规模化控制能力,挖掘负荷侧需求响应潜力,显著降低电网公司供电压力,还能为终端用户带来经济收益。

现有的负荷监测技术主要有侵入式和非侵入式2种。侵入式负荷监测技术需要为每一个电器装配数据采集设备,可详细获取电器的用电状态、用电行为与用电能耗。此方法安装与运维复杂,成本极高,不利于大范围改造和推广^[4]。而非侵入式负荷监测技术只需在用户户外装配数据采集设备,通过监测用户出口处的总电气量,利用智能负荷辨识算法分解得到户内电器的用电行为与能耗^[5],其安装与运维简单,成本低廉。

已有的非侵入式负荷监测及实际应用研究主要关注在对负荷及用电的智能感知与监测上。文献[6]提出了基于非侵入式负荷监测的用电节能系统,其手段为负荷监测,目的为用电节能。文献[7]同样提出了一种非侵入式电力负荷监测系统,其适用于海量用户在网运行,提高效率,减轻云端负荷。从上述文献及社会生活现状来看,其本质上只打通了从负荷到电网的单向负荷感知通道,未做到对用户负荷的细粒度评估与控制,无法在技术实现上打通电网公司与用户的精细化双向友好互动通道。为了实现电网公司与用户的精细化友好互动,需要对现有高级量测系统进行改造,实现智能监测与控制。

本文研究一种小微负荷智能监测与聚合分析系统,提出了基于马氏距离相似度匹配的小微负荷构成非侵入式监测方法,提出基于用户舒适度指标的小微负荷需求响应能力分级聚合方法,实现对小微负荷的智能监测、聚合评估及分类控制。该系统能够广泛接入、管理和控制各种类型负荷终端,可与电网公司需求响应平台或电力调控平台友好互动,为实现负荷侧灵活资源的聚合和策略控制的需求提供技术支撑和理论依据。

1 系统总体设计

系统硬件总体结构如图1所示,从下至上主要由设备层、量测控制终端层、边缘计算单元和负荷聚合云平台层构成^[7]。设备层是最底层,由

待监测与控制的家用电器及电力线路组成,是监测与控制的对象。量测控制终端层主要由智能断路器、智能插座及温度传感器组成:前两者除了常规功能外,还可以实时采集负荷辨识、聚合评估与控制所需数据;温度传感器主要采集用户室温数据,为温控负荷的控制提供数据基础。边缘计算单元主要负责接收多路量测终端采集的数据,进行负荷分解与能耗分类计量,将当前区域的聚合负荷构成信息上传至云计算平台层;同时接收云计算平台层下发的需求侧响应指令,在边缘计算单元进行调控计算,决策各家庭电器运行状态,并下发指令进行负荷调控。负荷聚合云平台层安装有数据库,接收位置不同的边缘计算单元的聚合负荷构成信息,实现整个系统需求侧响应能力的总体评估,参与电力市场并对中标结果进行响应决策,计算并调整负荷辨识特征库以及展示整个系统实时状态等。

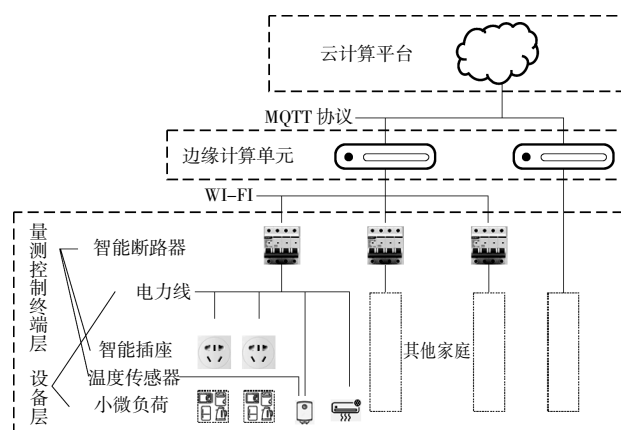


图1 系统总体架构

本系统的监测与控制采用“云-边-端”三层协同管理框架^[8],系统为实时在线监测与控制系统。每一户家庭的量测控制终端层配备一个智能断路器和有限数量的智能插座,此为“端”;因数据采集与传输数据量巨大,因此在地理位置接近区域(如同一楼层或同一单元)部署一台边缘计算单元,单元下所有智能断路器和智能插座连接至同一边缘计算单元,实现数据采集与传输计算的分布式架构,此为“边”;不同地域的所有边缘计算平台连接同一负荷聚合云平台,此为“云”。同时,本系统配备可直接与聚合云平台通过网络相连的用户小程序,用户可以通过小程序直接设置

自己的设备主观使用信息,并直接上传到聚合云平台。在本系统中,负荷分解与辨识、初级聚合评估由单一边缘计算单元完成,实现边缘计算分布式;负荷特征库的计算与调整、全系统需求侧响应能力的总体评估等由负荷聚合云平台完成。这样的系统设计不仅可以实现海量用户数的小微负荷实时监测、减轻云端负载,还可以将分散的负荷侧灵活资源整合起来,挖掘负荷侧需求响应潜力,提高对小微负荷的规模化控制能力。

2 系统算法实现

2.1 非侵入式负荷时空分解

2.1.1 数据采集与处理

首先由量测控制终端(包括智能断路器和智能空气开关)实时采集电力线上数据,包括电流瞬时值 i 和电压瞬时值 u , 计算有功功率 P 、无功功率 Q 、电流谐波幅值 I 、相角 φ 等特征值。

使用离散采样采集连续的瞬态交流电压电流,计算工频周期有功、无功功率有效值。其中有功功率有效值^[9]如式(1)所示:

$$P = \frac{1}{mN} \sum_{r=(n-1) \cdot mN+1}^{nmN} u_r \cdot i_r \quad (1)$$

式中: u_r , i_r 为离散电压电流序列, r 为采样序列序号; m 为频率; N 为每周期电压电流采样点数; n 为时间。

考虑到电压和电流的瞬态波形为非正弦波形,无功功率有效值计算采用1927年Budeanu提出的同频率无功功率定义^[10],并在实际的无功功率的计算中使用移相 90° 的电压序列与电流序列相乘,其无功功率有效值如式(2)所示:

$$Q = \frac{1}{mN} \sum_{r=(n-1) \cdot mN+1}^{nmN} u_{r+\frac{N}{4}} \cdot i_r \quad (2)$$

电器中流过的电流使用傅里叶级数表示为:

$$i(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega t + \theta_1) + I_2 \cos(2\omega t + \theta_2) + \dots + I_k \cos(k\omega t + \theta_k) \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为 t 时刻总电流; I_0 和 I_1 为电流的直流分量; I_k 为电流的 k 次谐波幅值; ω 为电流角频率; θ_k 为电流的 k 次谐波相角。

电流谐波的相角采用快速傅里叶变换法计算。首先记录每秒采集的电流样本数量,然后使用以下快速傅里叶变换公式来计算电流谐波幅值与相角^[4]:

$$F_i[\cdot] = \text{FFT}(i[\cdot]) \quad (4)$$

$$f_i(k) = (k-1) \cdot f_s / N_s \quad (5)$$

$$I_k = F_i(k \cdot 50 \cdot N_s / f_s + 1) \quad (6)$$

式中: FFT 表示快速傅里叶变换运算; N_s 是参与本次 FFT 运算的电流序列中的样本数量; $i[\cdot]$ 是参与本次 FFT 运算的电流序列; $F_i[\cdot]$ 是经过 FFT 运算后维度为 N_s 的幅值结果; $f_i(k)$ 为实际频率结果序列; I_k 是 k 次电流谐波幅值。

2.1.2 事件监测

当用户内部电器发生启停或运行状态发生变化时,电器总有功率会随之发生变化,这种有功功率发生较大改变的行为称为一个电器事件。通过监测智能断路器和智能插座来监测居民电力线上是否发生有功功率的改变,从而判定是否有电器事件发生。

本文使用的智能断路器电路结构含有干路和 M 条支路。其干路和支路总有功率为:

$$P_t = \sum_{i=1}^M P_{t,i} \quad (7)$$

$$P_{t,i} = \sum_{j=1}^g P_{t,i,j} + P_e \quad (8)$$

式中: P_t 为 t 时刻智能断路器干路总有功; $P_{t,i}$ 为 t 时刻第 i 条支路有功功率; $P_{t,i,j}$ 为第 i 条支路下第 j 个负荷的有功功率; P_e 为测量误差和未知负荷有功功率; g 为第 i 条支路下的已知负荷数目。

本文采用基于滑动窗的CUSUM算法进行事件监测^[11]。CUSUM是一种变点检测算法,其通过统计时间序列均值的变化来检测变点。其算法原理为:如果某一时间序列在某点开始存在异常,序列的概率分布(整个序列的均值、方差等)会发生改变。CUSUM算法优势在于对样本数据信息加以累积,将过程的小偏移累积起来达到放大的效果,从而提高检测过程中对小偏移的灵敏度。

2.1.3 特征提取

本文通过提取事件发生(即发生电器开启或关闭)区间负荷特征变化进行后续负荷匹配工作,提取和计算的每秒数据体征量包括:有功功率有效值、无功功率有效值、电流各次谐波含量、电流冲击系数等。

在智能断路器中完成数据采集和处理后,在边缘单元进行特征提取。

把电器事件发生前后一段时间的有功功率有

效值的平均值作差,得到有功功率和无功功率的特征变化量,如式(9)、式(10)所示:

$$\Delta P_t = |\bar{P}_{t_2} - \bar{P}_{t_1}|, \quad (9)$$

$$\Delta Q_t = |\bar{Q}_{t_2} - \bar{Q}_{t_1}|, \quad (10)$$

式中: \bar{P}_{t_2} 和 \bar{Q}_{t_2} 为负荷动作达到稳态后一段时间的有功和无功功率平均值; \bar{P}_{t_1} 和 \bar{Q}_{t_1} 为负荷动作达到稳态前的一段时间的有功和无功功率平均值。

电流谐波变化量计算方法与功率不同,其需要考虑电流谐波相角的变化,因此 k 次电流谐波幅值变化^[13]如式(11)所示:

$$\Delta I_k = [I_{k,t_1}^2 + I_{k,t_2}^2 - 2I_{k,t_1}I_{k,t_2}\cos(\theta_{k,t_2} - \theta_{k,t_1})]^{1/2}, \quad (11)$$

式中: t_1 为负荷工作前时刻; t_2 为负荷工作后时刻; I_{k,t_1} 和 I_{k,t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻 k 次谐波电流幅值; θ_{k,t_1} 和 θ_{k,t_2} 分别为 t_1 和 t_2 时刻 k 次谐波电流相角。

把电器投切时的最大周期电流有效值与电器达到稳态运行时的电流有效值之比称为电流冲击系数,其计算公式如式(12)所示:

$$k_p = \frac{\max(i[:])}{i'}, \quad (12)$$

式中: $\max(i[:])$ 代表以每周周期电流有效值组成序列的最大值; i' 代表小微负荷稳态运行时电流有效值。

2.1.4 负荷匹配

如 2.1.3 所述,使用每秒有功功率有效值、无功功率有效值、电流冲击系数及各次电流谐波有效值描述电器特征,用向量表示为 $X = [\Delta P, \Delta Q, k_p, \Delta I_2, \Delta I_3, \dots, \Delta I_m]$, 对于各类家用电器,其投切电器特征均服从均值为 μ , 协方差矩阵为 D 的正态分布。收集用户电器历史运行数据后,对各类电器大量的投切样本进行分析,得到组数据,第 n 组数据记为 X_n 。使用极大似然估计法求得模型总体分布,均值和协方差矩阵的极大似然估计值 $\hat{\mu}$ 和 \hat{D} 分别为:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n = \bar{X}, \quad (13)$$

$$\hat{D} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - \hat{\mu})^2. \quad (14)$$

本文采用相似度匹配方法进行负荷匹配。选取指标为马哈拉诺比斯距离(以下简称“马氏距离”),其表示点与一个分布之间的距离,是一种有效的衡量样本与负荷分布之间的相似度的方

法。对于一个均值为 μ , 协方差矩阵为 D 的分布,其任意一点的马氏距离 d 为:

$$d = \sqrt{(X - \mu)^T D^{-1} (X - \mu)}. \quad (15)$$

在负荷匹配过程中,对于每一类电器,设定一置信边界距离 d_s 。当样本与该负荷分布中心的马氏距离不大于置信边界距离 d_s ,则可以判定该样本特征值代表此类电器投切特征值,否则排除此类电器可能。

2.2 小微负荷响应能力分级聚合

2.2.1 小微负荷特性与响应能力建模

居民家用负荷具有多样性和差异性。不同家用负荷的物理特性及使用功能均不同。根据居民负荷的使用特性及响应特征不同,将居民负荷分为可转移负荷、可中断负荷、可平移负荷、基础负荷^[13]。

1)可转移负荷。此类负荷一般在负荷工作周期内消费电能总量保持不变,负荷运行时功率恒定或可变,可以在负荷使用期间中断,其对时间敏感度较低,例如储能(电动汽车)、冰蓄能等。

假设该类负荷允许在 $t=a$ 之后开始工作,并在不晚于 $t=b$ 完成用电任务,其运行功率恒定为 P_t ,其用电总耗能为 E_t ,则其用电特性建模^[14]为:

$$x_t = 0, \quad \forall t \in [1, a) \cup (b, t_{\max}] \quad (16)$$

$$\sum_{t=a}^b x_t P_t = E_t \quad (17)$$

式中: x_t 是可转移负荷在 t 时段开关状态,为 0-1 变量,开启时为 1,关断时为 0; P_t 为 t 时段负荷功率; t_{\max} 为最大调度时段数。

对于这 4 类负荷,按照负荷在本时段是否可以参与响应及最大可响应功率容量为标准,定义可转移类负荷响应能力函数为:

$$U_1(t) = \begin{cases} P_t, & \sum_{t=a}^t x_t P_t + \sum_{t=t}^b x_t P_{t_{\max}} > E_t \\ 0, & \sum_{t=a}^t x_t P_t + \sum_{t=t}^b x_t P_{t_{\max}} \leq E_t \end{cases}. \quad (18)$$

2)可中断负荷。此类负荷可中断,不可转移,是否中断会影响用户舒适程度。一般居民小微负荷中可中断负荷均为温控负荷,如空调等。其调节方式一般为温度调节和开关调节混合进行。

空调等效热参数模型^[15]为:

$$T^t = (1-\varepsilon)T_o^t + \varepsilon T^{t-1} - \eta_{\text{air}}^2 (1-\varepsilon) \frac{x_{\text{air}}^t P_{\text{air}}}{A}, \quad (19)$$

$$P_{\text{air}} = \eta_{\text{air}} P_t, \quad (20)$$

式中: T^t 为 t 时刻室内温度; P_{air} 为空调机组的制冷制热功率; η_{air} 为空调能效比; P_t 为空调运行电功率; ε 为散热函数(即室内温度改变的惯性系数); A 为导热系数; T_o^t 为 t 时刻室外温度; x_{air}^t 为 0-1 变量, 值为 0 时代表空调关闭, 值为 1 时代表空调开启。

用户会在某一温度范围内感到舒适, 空调温度约束为:

$$T_{\min} \leq T_t \leq T_{\max}. \quad (21)$$

空调等可中断负荷的响应能力函数为:

$$U_2(t) = \begin{cases} P_t, & (1-\varepsilon)T_o^t + \varepsilon T^{t-1} \geq T_{\min} \text{ or} \\ (1-\varepsilon) \left(T_o^{t+1} - \frac{\eta_{\text{air}} P_{\text{air}}}{A} \right) + \varepsilon T^{t-1} \leq T_{\max} \\ 0, & \text{other cases} \end{cases}, \quad (22)$$

3)可平移负荷。该类负荷可平移, 在使用过程中不可中断, 负荷的使用受工作流程和规定时间约束, 例如洗衣机、微波炉等。

假设该类负荷允许在 $t=a$ 之后开始工作, 并不晚于 $t=b$ 完成用电任务, 其用电任务持续时间为 L_1 , 运行功率为 P_t , 运行次数设定为 m , 则用电特性建模^[14]为:

$$\begin{cases} x_t = 1, \forall t \in [a, b] \\ x_t = 0, \forall t \in [1, a] \cup (b, t_{\max}) \end{cases}. \quad (23)$$

因其不可中断运行特性, 可得用电特性约束为:

$$\sum_{t=j}^{j+L_1-1} x_t \geq (x_j - x_{j-1}) \cdot L_1, \forall j \in (a, b - L_1 + 1), \quad (24)$$

式中: x_t 是负荷在 t 时段开关状态, 为 0-1 变量, 开启时为 1, 关断时为 0。

运行次数约束为:

$$\sum_{t=a}^b x_t = m \cdot L_1. \quad (25)$$

定义可平移类负荷响应能力函数为:

$$U_3(t) = \begin{cases} P_t, & \sum_{t=a}^t x_t P_t + \sum_{t=t}^b x_t P_{t_{\max}} > E_t \\ 0, & \sum_{t=a}^t x_t P_t + \sum_{t=t}^b x_t P_{t_{\max}} \leq E_t \end{cases}. \quad (26)$$

4)基础负荷。这类负荷是家庭生活必备的不可关闭电器, 如果进行调控会极大影响用户舒适

程度, 一般不调控。

2.2.2 小微负荷响应能力聚合

传统的需求响应不考虑参与负荷类型, 对某区域负荷均统一调配, 缺乏对小微负荷响应能力细粒度评估, 不能精细化调控。

对于一小微负荷聚合商, 其管理范围内的小微负荷总需求响应能力为某时段各用户各类型负荷响应能力综合, 即:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N (U_1(t) + U_2(t) + U_3(t)), \quad (27)$$

式中: N 为管辖范围内用户数。

2.3 小微负荷响应控制

2.3.1 小微负荷需求响应控制模型

对于用户来讲, 小微负荷的运行状态与用户使用意愿和用户舒适度相关。本文对文献[16]提出的用户舒适度指数进行改进和完善, 构建用户舒适度指标来衡量用户使用该家用电器的舒适程度。该指标一方面可以表征用户使用家电的舒适程度, 另一方面也可以使用舒适度指标为需求响应控制做指导。

定义用户舒适度指标 K_{com} 为:

$$K_{\text{com}} = \frac{|\text{小微负荷(需求指标)实时状态} - \text{小微负荷(需求指标)设定值}|}{\text{负荷运行(需求指标)设定范围}}. \quad (28)$$

由用户舒适度指标定义可知, 负荷实时状态偏离设定值越多, 其用户舒适度越小, 表明其参与需求响应意愿或优先级越低。经过标么化的用户舒适度指标可用于需求响应控制优先级作参考。

1)可转移负荷用户舒适度。

可转移负荷用户舒适度与已消耗电量和当前时间有关, 其指标表示为:

$$K_{\text{com}} = \begin{cases} K_t \cdot \left(1 - \frac{E_t}{E_t} \right), & K_t = 1 \\ 1, & K_t = 0 \end{cases}, \quad (29)$$

式中: K_t 中为 t 时刻是否在规定时间内完成任务标志, 其值为 1 代表工作还在规定时间中, 值为 0 代表工作未完成, 并且已经超出规定时间; E_t 为可转移负荷已消费电能。

2)可中断负荷用户舒适度。

温控负荷等可中断负荷的用户舒适度与室内温度有关, 其指标表示为:

$$K_{\text{com}} = \begin{cases} \left| \frac{T - 0.5 \times (T_{\min} + T_{\max})}{0.5 \times (T_{\min} + T_{\max})} \right|, & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ 1, & T < T_{\min} \text{ or } T > T_{\max} \end{cases}, \quad (30)$$

式中： T_{\min} 与 T_{\max} 分别为用户感觉舒适的最小与最大温度； T 为当前温度。

(3)可平移负荷用户舒适度

可平移负荷的用户舒适度与在规定时间内是否可以完成规定任务有关，其指标表示为：

$$K_{\text{com}} = \begin{cases} 0, & K_i = 1 \text{ and (Task Accomplished)} \\ 1, & K_i = 0 \text{ or} \\ & (K_i = 1 \text{ and Task Not Accomplished)} \end{cases}. \quad (31)$$

2.3.2 小微负荷需求响应控制方案

为了进行合理的小微负荷需求响应控制，需要制定小微负荷聚合商的最优控制策略。假设系统维持安全稳定，小微负荷聚合商的调度与控制目标制定为：在保证用户舒适度水平不变或者尽量小幅减小的前提下，保证经济收益最高。小微负荷聚合商收入来源为：以管辖区域内的居民用户为整体来为电网公司需求侧响应提供服务，从而获得资金收入；而小微负荷聚合商需从用户一方获得参与需求侧响应的负荷资源，因此需付出成本给用户。

本文主要关注日内小微负荷需求响应控制策略，并且主要关注调峰服务。首先在各时段对管辖区域内可参与需求侧响应服务聚合资源总量进行评估，再对历史成交电价进行估计，参与投标，获得中标价格和中标响应量后对管辖区域内的用户资源进行调度，使得付出成本最小，进而收益最多。

获得中标响应量 $U_c(t)$ 后，小微型负荷聚合商分别考察该时段内所有可转移负荷响应能力 $\sum_{i=1}^N U_1(t)$ ，所有可中断负荷响应能力 $\sum_{i=1}^N U_2(t)$ ，则需求侧响应有如下几种情况：

1) $U_c(t) \leq \sum_{i=1}^N U_1(t)$ ，即中标响应量小于所有可转移负荷响应能力。此时，对所有参与需求侧响应用户按照户均可转移负荷用户舒适度平均值排序，由低至高参与需求侧响应；在处于响应量边界时，优先响应中标响应量较小者。

2) $\sum_{i=1}^N U_1(t) < U_c(t) \leq \sum_{i=1}^N (U_1(t) + U_2(t))$ ，即中

标响应量大于所有可转移负荷响应能力，同时小于所有可转移和可中断负荷响应能力总和。此时，对所有参与需求侧响应用户按照户均可中断负荷用户舒适度平均值排序，由低至高参与需求侧响应；在处于响应量边界时，优先响应中标响应量较小者。

3) $U_c(t) > \sum_{i=1}^N (U_1(t) + U_2(t))$ ，即中标响应量大于所有可转移和可中断负荷响应能力总和，因在日内控制阶段，可平移负荷无法执行负荷关断操作，因此，最大响应能力仍为 $\sum_{i=1}^N (U_1(t) + U_2(t))$ 。

3 系统测试与分析

3.1 系统部署

本系统在包含有30间房间的某单位员工宿舍开展部署和运行测试。其中，每间房间量测控终端层均安装含有5条支路和1条干路的智能断路器。每10间房间配套1台边缘计算单元。整个系统部署一套独立开发的负荷聚合云平台。

3.2 系统测试

3.2.1 非侵入式负荷时空分解

本系统中，每户房间均安装以下5种小微负荷，其特征信息如表1所示。

表1 小微负荷特征库信息

设备	有功/W	无功/Var	冲击系数	三次谐波/A	五次谐波/A
空调	1 291	302	3.22	0.495	0.769
热水器	1 600	15	1.01	0.041	0.061
热水壶	1 495	10	1.01	0.038	0.050
微波炉	1 037	355	1.08	1.666	0.767
电视机	161	41	1.46	0.106	0.080

为验证本文提出方法的有效性和合理性，对小微负荷进行投切实验，图2为各个小微负荷在开启和关闭的过程中测量到的有功功率和无功功率曲线。可以看出，有功功率和无功功率存在一定程度的波动性，这给事件检测和负荷匹配带来一定困难。

对本文提出算法在本系统中进行1 000次测试，对每类电器各开启和关闭100次，得到的事件检测和负荷匹配结果如表2所示。可以看出：本文提出的事件检测方法对所有电器投切事件的检测都很有效，且准确率较高；本文提出的负荷

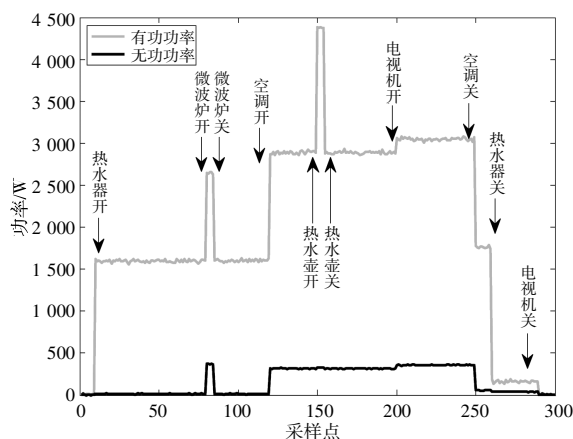


图 2 系统小微负荷运行功率曲线

表 2 事件检测及负荷辨识结果统计

设备	测试数目 / 次	事件监测		负荷匹配	
		准确数 / 次	准确率 / %	准确数 / 次	准确率 / %
空调	200	199	99.5	185	93.0
热水器	200	197	98.5	192	97.5
热水壶	200	199	99.5	191	96.0
微波炉	200	200	100	196	98.0
电视机	200	199	99.5	195	97.9
总计	1 000	994	99.4	959	96.5

匹配方法也有很高的辨识精度, 但空调负荷匹配准确率较其他电器偏低, 经分析是空调每次启动的特征较为分散导致的。

3.2.2 小微负荷响应能力分级聚合

本系统中, 通过非侵入式负荷时空分解后可知用户各小微负荷运行状态, 为后续的小微负荷参与需求侧响应的能力聚合和控制提供数据基础。

小微负荷的运行功率和负荷需求设定如表 3 所示。考虑到算法测试需求, 引入电动汽车充电数据, 虚拟接入系统中测试算法性能。

表 3 小微负荷功率及需求信息

设备	有功功率/W	负荷类型	负荷需求设定
空调	1 291	可中断	23~27 °C
热水器	1 600	可中断	40~50 °C
热水壶	1 495	可平移	不可控
微波炉	1 037	可平移	不可控
电视机	161	可中断	无需求
电动汽车	4 000	可转移	次日凌晨 5:00 前充满

本系统采用杭州市负荷参与需求侧响应市场规则, 在每天 10:30, 13:30, 16:00, 20:00 共计 4

个时段进行小微负荷能力分级聚合。

选取本系统 2021 年某一天的情况进行计算, 各类型小微负荷响应能力如图 3 所示。

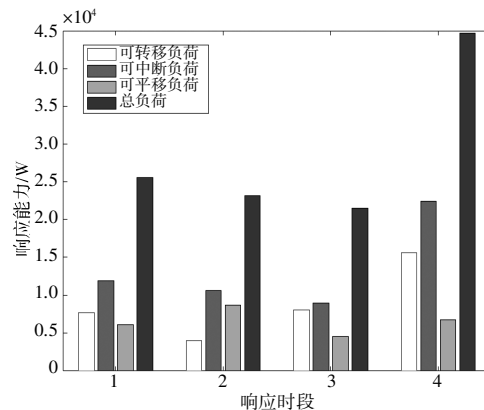


图 3 系统小微负荷响应能力分级聚合

表 4 为第一时段宿舍中各用户小微负荷开启信息, 展示了图 3 所示数据的计算流程, 可显示本系统负荷辨识和负荷能力分级聚合的细粒程度。

表 4 第一时段小微负荷运行信息

设备	有功功率/W	负荷类型	用户编号
电动汽车	3 848, 3 752	可转移	5, 7
空调	1 295, 1 290, 1 280	可中断	6, 7, 10
热水器	≈1 590	可中断	3, 5, 9, 18, 21
热水壶	≈1 500	可平移	7, 10
微波炉	≈1 020	可平移	7, 10, 25, 28
电视机	155	可平移	10

分析图 3 数据可以看出, 晚间时段三类负荷的响应能力都很高, 这是由于该时段用户都在家中使用电器, 因此其可以参与需求侧响应。三类负荷横向比较, 可中断负荷相比于其他两类负荷的需求侧响应能力较强, 这是因为空调和热水器均为可中断负荷, 其起到维持室温和水温的作用, 即使白天用户家庭没有人时, 也被允许工作。而白天用户家庭无人时, 可转移负荷(电动汽车)和可平移负荷不在工作, 因此其参与需求侧响应的能力较小。

选取 2021 年连续一周每天晚间时段的小微负荷各类型负荷响应能力进行统计, 其变化情况如图 4 所示。

分析图 4 数据可以看出, 同样是在晚间时段, 三类负荷和总负荷在工作日和非工作日的需求侧响应能力有明显差别。周末时段的小微负荷需求

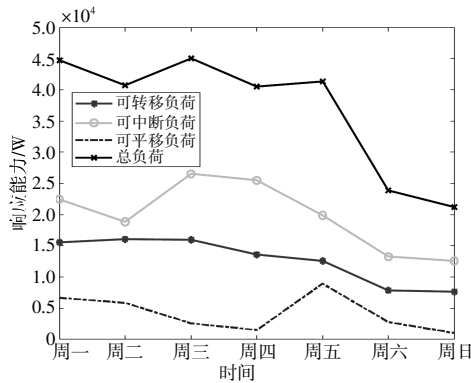


图4 一周内晚间时段小微负荷响应能力分级聚合

侧响应能力明显弱于非工作日，这是因为周末时段很多用户晚上在外活动，很多小微负荷不开启使用，因此其需求侧响应能力较弱。

同样选取这一周同一时段，家庭总负荷及其需求侧响应能力曲线变化如图5所示。

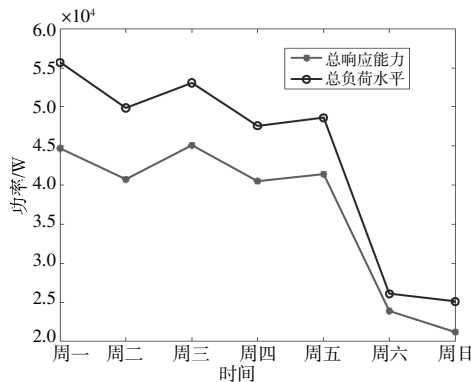


图5 一周内晚间时段小微负荷水平与响应能力

分析图5数据可以看出，因为用户对自身舒适度的感受不同，因此并非所有负荷均可参与需求侧响应，用户总负荷水平大于总响应能力。

3.2.3 小微负荷响应控制

为验证本文所提小微负荷参与需求侧响应控制策略在系统中运行有效性，与3.2.2节选取相同一周同一时段，假定相同中标量，并分别设定中标量为5~3.5 kW 计算系统实际响应情况，不同中标量对应实际响应情况如图6所示。

分析图6数据可以看出，因为可平移负荷无法参与响应，用户在日内可参与需求侧响应能力为可转移负荷和可中断负荷响应能力总水平，其小于理论上的总需求侧响应能力。通过分析图6数据可知，当中标量不大于实际可响应能力时，

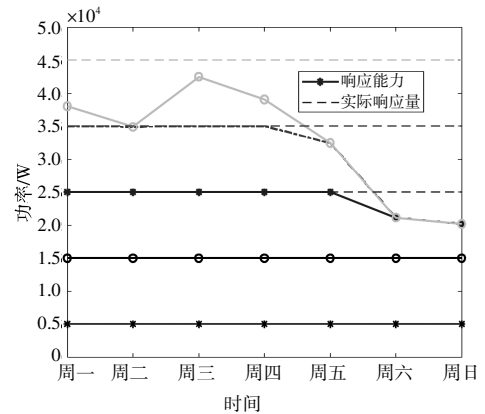


图6 一周内晚间时段小微负荷实际响应能力与中标量

所有中标量均可以消纳；而当中标量大于实际可响应能力时，不能完全消纳中标量，只有违约选择。因此，小微负荷聚合商准确评估自身管辖范围内小微负荷参与需求侧响应能力是必要的。

4 结论

本文构建一种小微负荷智能监测与聚合分析系统，较好地实现了对小微负荷进行细粒度监测与聚合控制。

1)考虑用户功率、电流等特征差异，提出基于马氏距离相似度匹配的小微负荷构成非侵入式监测方法。通过数据处理、事件监测、特征提取和负荷匹配等步骤实现小微负荷的细粒度监测。

2)考虑小微负荷的物理特性和响应原理存在差异，提出基于用户舒适度指标的小微负荷需求响应能力分级聚合方法。通过分析各种不同类型的小微负荷在用户舒适度指标下的当前负荷可用性及其功率，实现小微负荷响应能力评估。

3)在本文所应用的小微负荷智能监测与控制系统中对所提方法进行实际测试。结果表明该系统能够完成预定各项设计功能，实现了对该系统管辖区域内小微负荷的监测、需求响应能力评估及负荷调控。

本研究为后续更深层次研究提供了测试平台，为打通电网与负荷友好互动通道做出有益实践，打好了坚实基础。在后续研究中，可以考虑更复杂的小微负荷响应能力指标，通过提供多类型、多时段的需求响应服务，研究更好的控制手段；也可以在商业模式上进行理论创新，实现对小微负荷智能监测与控制系统的更深层次利用。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相.电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J].中国电机工程学报,2013,33(22):1-11.
- [2] 张潼,于鹤洋,田江,等.基于非侵入式负荷辨识的聚合负荷需求响应能力在线评估[J].电力工程技术,2020,39(6):19-25.
- [3] 潘明明,田世明,刘宗杰,等.能源互联网中需求侧资源参与电网控制的边云协同技术研究[J].电子技术应用,2021,47(4):24-29.
- [4] 余贻鑫,刘博,栾文鹏.非侵入式居民电力负荷监测与分解技术[J].南方电网技术,2013,7(4):1-5.
- [5] HART G W."Nonintrusive appliance load monitoring" in Proceedings of the IEEE.1992,80(12):1870-1891.
- [6] 傅伟栋.基于非侵入式负荷监测的用电节能系统[J].农村电工,2020,28(11):38-40.
- [7] 王爱囡,袁麓,丁长波,等.一种非侵入式电力负荷监测系统的设计与实现[J].西安理工大学学报,2019,35(3):343-351.
- [8] 李知艺,宋克轩.基于云边协同计算的主动配电网调度研究评述[J/OL].浙江电力;1-7[2021-07-05].<https://doi.org/10.19585/j.zjdl.202106003>.
- [9] 赵少东,饶竹一,张云翔,等.基于多源特征量的非侵入式三相空调辨识研究[J].电气自动化,2019,41(5):41-44.
- [10] IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal,non-sinusoidal,balanced,or unbalanced conditions:IEEE 1459-2000[S].IEEE,2000.
- [11] 严永辉,李新家,王淑云,等.基于云端协同的家用电器负荷辨识能力提升技术研究[J].电力需求侧管理,2021,23(3):58-63.
- [12] TORQUATO R,SHI Q,XU W,et al.A Monte carlo simulation platform for studying low voltage residential networks" in IEEE Transactions on Smart Grid[J].2014,5(6):2766-2776.
- [13] 冷钊莹,陈中,邢强,等.基于负荷类型细分的负荷聚合商日前投标非合作博弈模型[J].电网与清洁能源,2020,36(5):17-28.
- [14] 孙毅,裴俊亦,景栋盛.考虑用户行为不确定性的智能家电控制策略[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):109-117.
- [15] ROH H,LEE J.Residential demand response scheduling with multiclass appliances in the smart grid" in IEEE Transactions on Smart Grid[J].2016,7(1):94-104.
- [16] 汤奕,鲁针针,宁佳,等.基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J].电力系统自动化,2014,38(9):93-99.
- [17] 王燕,杨秀媛,徐剑锋,等.民用可控负荷参与需求响应的控制策略[J].发电技术,2020,41(6):638-649.
- [18] 王帅,赵建平,王志远,等.基于云计算平台实现电网短期负荷预测算法的研究[J].四川电力技术,2019,42(1):29-32.
- [19] 张宜忠,杨旭东,张正卫,等.考虑气象累积效应的IP-SO-BP神经网络短期负荷预测算法[J].四川电力技术,2019,42(3):1-5.

收稿日期:2021-07-12; 修回日期:2021-08-27

作者简介:王异成(1975),男,高级工程师,研究方向为电力与能源技术管理。

罗华峰(1989),男,高级工程师,研究方向为新能源并网与储能技术应用。(通讯作者)

(本文编辑:徐 晗)