

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.004

# 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

张潼<sup>1</sup>, 于鹤洋<sup>2</sup>, 田江<sup>3</sup>, 樊海锋<sup>4</sup>, 陈昶宇<sup>2</sup>, 耿光超<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215004; 4. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:**用户侧负荷资源数量众多、容量不均、分布零散、响应潜力强,具备参与电网调节的能力。基于负荷功率、电流等特征差异,建立负荷特征指纹库,提出面向居民电器的基于多元高斯模型的非侵入式低压负荷构成辨识方法,实现居民用能的在线分解。基于同类电器特征相似的特点,获取底层居民负荷动作和可中断类型后,在同一台区下,提出由下至上的台区负荷需求响应能力在线聚合监测方法,实现台区负荷资源参与需求响应的能力评估。基于 REDD 数据集和台区拓扑的测试表明,该方法对居民负荷具有较高的辨识度,可较好地监测台区负荷资源参与需求响应的能力,为负荷侧海量泛在资源的整合及参与系统调峰、调频等智慧化利用提供了方式和途径。

**关键词:**非侵入式;负荷辨识;需求响应;聚合监测;在线评估

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0019-07

## 0 引言

近年来,随着可再生能源渗透率的提高<sup>[1]</sup>,传统发电侧的可调节资源不断压缩,电网可调节性能降低。协调海量分布式发电资源参与电力系统调控是可行的技术路线<sup>[2-3]</sup>。用户侧负荷资源数量众多、容量不均、分布零散、响应潜力强,具备参与电网调节的能力。通过物联网技术监测、聚合低压用户侧的可控负荷<sup>[4-5]</sup>,使其规模化参与需求响应,可显著提升参与响应用户的收益,同时降低电力公司的供电压力,提高供电效率。实施需求侧响应的前提是对海量低压用户中的负荷种类、运行状态等用电数据进行在线监测与分析。

现有的负荷监测技术可分为侵入式与非侵入式2种。侵入式负荷监测为每个电器配备数据采集装置,可精确获知不同电器的行为与能耗,此方式成本高,操作复杂,不利于大范围推广<sup>[6]</sup>。非侵入式负荷监测(non-intrusive load monitoring, NILM)只在上游入户处安装一个数据采集装置,通过监测聚合的电气量,使用负荷分解算法,得到下游的单体电器用电行为<sup>[7-8]</sup>,具有成本低、操作简单等优势。

近年来需求侧响应的研究主要着重于需求侧响应的模式和电价机制、参与电力系统调峰和调频的控制策略问题及考虑需求侧响应的电力系统经济调度问题等<sup>[9-12]</sup>。NILM的研究主要聚焦于人工智能在NILM中的可用性<sup>[13-19]</sup>。目前已有文献在聚合负荷建模及应用方面开展研究,文献[20]提出

温控负荷聚合近似建模方法和聚合负荷服务供给模式;文献[21]提出负荷聚合商可为需求响应资源提供参与市场调节的机会。对于用户侧负荷资源参与需求侧响应能力问题<sup>[22-27]</sup>,文献[23]提出一种面向需求响应的建筑用能在线分解方法,并验证了该方法对需求响应资源具有较高的辨识精度;文献[24]提出一种电力需求侧响应削峰潜力评估方法和流程,该方法使用电力系统的调度运行数据,未考虑更细粒度的用电数据。现有研究着重进行分解方法的优化,注重负荷分解精度的提升,但缺少对其参与需求侧响应能力的监测。部分研究基于历史数据,可实现整体性评估,但无法用于用户侧负荷参与需求响应的在线监测。

在现有研究基础上,文中提出一种基于NILM的聚合负荷需求响应能力在线评估方法。首先,使用高级量测系统(advanced metering infrastructure, AMI)中的智能电表数据在用户层执行NILM,获得用户运行电器的类型和运行功率等;然后,将用户内部温控负荷运行功率聚合,实现用户参与需求响应能力的在线监测;最后,将同一台区下所有用户内部温控负荷聚合,实现台区低压负荷需求响应能力的在线监测。在AMI数据流可用情况下,即可在线辨识、聚合、监测台区低压负荷参与需求响应的能力。

## 1 低压电力负荷构成辨识方法

### 1.1 负荷特征及指纹库构建

负荷特征主要由稳态功率特征、稳态谐波特征

收稿日期:2020-05-20;修回日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607155)

构成。其中,稳态功率特征包括稳态有功、无功功率变化;稳态谐波特征包括电流高次谐波幅值及相角。

采集得到电器高频运行数据,经过事件检测和特征提取步骤,可根据多元高斯模型在特征空间中拟合得到负荷特征指纹库中的电器特征。相应电器在特征库中的参数由特征空间中每一簇特征点的均值向量、协方差矩阵以及截止概率  $P_n$  组成。

当电器未出现在负荷特征指纹库中时,首先进行未辨识特征的数据存储,然后通过人工标记的方式识别该未辨识特征是否为未出现在负荷特征指纹库中的电器,如果人工判定为是,则更新特征库,增加电器类型及相应参数。若判定为漏判已有电器,则更新指纹库中相应电器参数。

### 1.2 数据采集

当电器运行时,可在入户总线上检测到不断变化的电压、电流。使用不同采样精度的量测仪器,得到在时间尺度上颗粒度不同的电压、电流量测数据。使用交流采样将连续的瞬态电压、电流离散化,计算每秒稳态有功、无功功率有效值,分别如式(1)、式(2)所示<sup>[28]</sup>。

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

$$Q = \frac{1}{mN} \times$$

$$\sum_{n=1}^m \sqrt{\sum_{r=(n-1)N+1}^{nN} u_r^2 \sum_{r=(n-1)N+1}^{nN} i_r^2 - \left( \sum_{r=(n-1)N+1}^{nN} i_r u_r \right)^2} \quad (2)$$

式中: $r$ 为采样点编号; $u_r, i_r$ 分别为离散电压、电流序列; $m$ 为频率,文中取 50 Hz; $N$ 为每周期采样点数; $n$ 为时间。

电器中的电流为:

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

式中: $I_0$ 为直流电流分量; $I_1$ 为基波电流幅值; $I_k$ 为  $k$ 次谐波电流幅值; $\omega$ 为角频率; $t$ 为时间; $\theta_k$ 为  $k$ 次谐波电流相角。

### 1.3 事件监测

当电器发生开、断或运行状态变化时,电器消耗的总有功率必定发生改变。对于用户来说,定义电器发生了从投入到切除,或从切除到投入,或是在运行中从一个档位切换到了另一个档位等使其有功功率发生了较大改变的行为是一个事件。通过检测入户总线是否发生有功功率的较大改变判定是否有事件发生,即电器是否动作。

对于一个用户来说,其入口总有功率为:

$$P_t = \sum_{i=1}^g P_{t,i} + P_e \quad (4)$$

式中: $P_t$ 为  $t$ 时刻用户入口总有功率; $P_e$ 为测量误差和未知电器的总有功率; $P_{t,i}$ 为电器  $i$ 在  $t$ 时刻的有功功率; $g$ 为电器总数。

当电器在平稳运行时,瞬时有功功率不断波动, $P_t$ 也随之不断波动。设  $T_e$ 为总有功率波动阈值,则在电器稳定运行时, $P_t$ 的波动范围总是不超过  $T_e$ ,即:

$$|\Delta P_t| = |P_{t+1} - P_t| \leq T_e \quad (5)$$

当事件发生时, $P_t$ 会发生较大改变, $P_t$ 的波动超过  $T_e$ ,则事件发生的判定准则为:

$$|\Delta P_t| > T_e \quad (6)$$

当电器变换状态完成时,又会恢复到平稳运行状态,称为事件的结束。

### 1.4 特征提取

事件发生后,当检测到事件结束时,可提取电器从事件开始到结束的总有功率等电器特征。

对电器投切前后一段时间内的有功功率有效值取平均值作差,即可得稳态有功功率增量。

$$\Delta P_j = |\bar{P}_{j+1} - \bar{P}_j| \quad (7)$$

式中: $\bar{P}_{j+1}$ 为电器动作达到稳态后的一段时间有功功率平均值; $\bar{P}_j$ 为电器动作前的稳态有功功率平均值。

同理,稳态无功功率的增量为:

$$\Delta Q_j = \frac{(\bar{P}_{j+1} - \bar{P}_j)(\bar{Q}_{j+1} - \bar{Q}_j)}{|\bar{P}_{j+1} - \bar{P}_j|} \quad (8)$$

式中: $\bar{Q}_{j+1}$ 为电器动作达到稳态后的一段时间无功功率平均值; $\bar{Q}_j$ 为电器动作前的稳态无功功率平均值。

计算电流谐波变化量时,需要考虑电流谐波相角的变化。 $k$ 次电流谐波幅值变化量为:

$$\Delta I_k = \sqrt{I_{k,t_1}^2 + I_{k,t_2}^2 - 2I_{k,t_1}I_{k,t_2}\cos(\theta_{k,t_2} - \theta_{k,t_1})} \quad (9)$$

式中: $t_1$ 为电器动作前的时刻; $t_2$ 为电器动作后的时刻; $I_{k,t_1}$ 为  $t_1$ 时刻  $k$ 次谐波电流幅值; $I_{k,t_2}$ 为  $t_2$ 时刻  $k$ 次谐波电流幅值; $\theta_{k,t_1}$ 为  $t_1$ 时刻  $k$ 次谐波电流相角; $\theta_{k,t_2}$ 为  $t_2$ 时刻  $k$ 次谐波电流相角。

采集的电流量为离散数据,则谐波电流相角计算采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)法。记录每秒采集的电流量序列长度,使用 FFT 计算谐波电流幅值与相角。

$$R_i = f_{\text{FFT}}(i) \quad (10)$$

$$f_i(k) = (k-1)f_s/N_s \quad (11)$$

$$I_k = R_i(50kN_s/f_s + 1) \quad (12)$$

式中:  $f_{\text{FFT}}$  表示 FFT 运算;  $i$  为  $f_{\text{FFT}}$  运算的电流序列;  $N_s$  为  $f_{\text{FFT}}$  运算的电流序列长度;  $R_i$  为  $i$  经过 FFT 运算后长度为  $N_s$  的幅值序列;  $f_i(k)$  为实际频率序列;  $f_s$  为采样频率。

### 1.5 模型建立

引入多元高斯模型对电器特征进行描述<sup>[29]</sup>, 建立基于多元高斯模型的非侵入式居民电力负荷辨识模型。多元高斯模型是一维正态分布在高维空间的推广。

向量  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$  是均值为  $\boldsymbol{\mu}$ 、协方差矩阵为  $\mathbf{C}$  的多元高斯分布, 概率密度函数为:

$$p(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = \frac{e^{-(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})/2}}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{C}|^{1/2}} \quad (13)$$

多元高斯模型的均值和协方差矩阵可以通过极大似然估计法求得。对于  $N$  个样本点:  $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$ , 其极大似然估计为:

$$\hat{\boldsymbol{\mu}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{X}_n = \bar{\mathbf{X}} \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{C}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\mathbf{X}_n - \hat{\boldsymbol{\mu}}) (\mathbf{X}_n - \hat{\boldsymbol{\mu}})^T \quad (15)$$

给定数据样本后, 利用式(13)一式(15)可得多元高斯模型的参数值, 从而得到模型的分布。

在文中非侵入式电力负荷分解模型中, 共有稳态有功功率变化、稳态无功功率变化和  $m$  组电流高次谐波变化量, 共计  $m+2$  维向量。对于同一类电器来说, 理论上每次从关闭状态切换到稳态运行和每次从稳态运行切换到关闭状态的各维特征的变化量基本相同。而实际运行开启或关闭时, 各种电器提取的特征向量会在空间形成簇, 每一簇代表一类电器。对于每一簇来说, 空间中的任何一个点越接近这个簇, 则这个点属于这个簇的概率越大。针对第  $n$  个簇(第  $n$  类电器), 设定截止概率为  $P_n$ , 空间一点对于这个簇的概率为  $P$ 。若  $P > P_n$ , 认为此点属于该簇, 即这个特征点所代表的电器为电器  $n$ ; 若  $P < P_n$ , 认为此点不属于该簇, 即这个特征点所代表的电器不是电器  $n$ 。理论上, 一个特征点只能属于  $m+2$  维空间中一个簇, 或者不属于任何一个簇(此点实为陌生电器或漏判电器)。基于多元高斯模型的电力负荷分解模型如图 1 所示, 计算方法如式(16)所示。

$$P_n = \min_{\mathbf{X} \in n} f(\mathbf{X}, \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\mathbf{C}}) \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{X} \in n$  表示  $\mathbf{X}$  属于第  $n$  个簇。

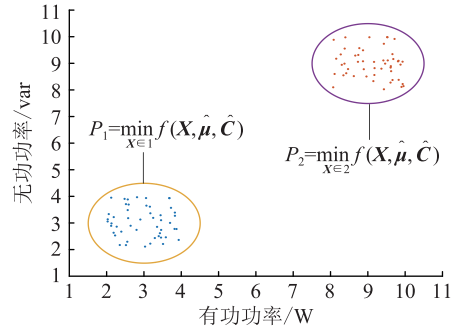


图 1 基于多元高斯模型的电力负荷分解模型  
Fig.1 Power load decomposition model based on multivariate Gaussian model

## 2 台区负荷响应能力在线聚合监测框架

针对居民用电场景, 空调、热水器等大功率温控负荷及其他大功率可中断负荷被认为具有较强的需求响应潜力, 特点如下<sup>[30]</sup>:

(1) 调控潜力巨大。在夏季用电高峰期, 空调等温控负荷占电网总负荷的 30%, 苏州等中心电网的空调负荷占最高负荷的 40% 以上, 给电力系统带来了很大负担, 同时影响电力系统的安全稳定。

(2) 调控影响较小, 温控负荷有热惯性。当空调或热水器短时关闭时, 对人体舒适度几乎无影响。

(3) 调节与控制技术效果显著。目前电力公司对居民用户负荷运行情况观测和控制技术有限, 可控负荷规模化参与需求响应是亟待解决的问题。

文中提出基于 NILM 的台区级居民负荷需求响应能力在线聚合监测框架, 由低压电力负荷构成辨识、需求响应能力在线聚合监测两部分组成。

### 2.1 低压电力负荷构成辨识

台区级居民用电场景下, 如何协调利用海量温控负荷资源是亟待解决的问题。文中采用基于多元高斯模型的非侵入式低压负荷构成辨识方法, 实现居民用能在线分解。

(1) 在居民入户处安装负荷监测模块, 进行居民负荷用电数据采集、计算工作。用电数据为按照  $N$  点/s 的频率在  $t$  时刻采集的母线电压序列  $U[N]$ , 母线电流序列  $I[N]$ 。计算  $t$  时刻负荷电压序列  $U_t[N]$  的有效值  $U_t$ , 负荷电流序列  $I_t[N]$  的有效值  $I_t$ , 有功功率  $P_t$ , 无功功率  $Q_t$  和电流高次谐波等。

(2) 事件检测。计算  $t+1$  时刻与  $t$  时刻的有功功率差  $\Delta P = P_{t+1} - P_t$ , 当  $|\Delta P| > c$  时, 判定事件发生, 即有负荷加入或退出,  $c$  为事件发生阈值。待事件结束后, 计算无功功率差  $\Delta Q = Q_{t+1} - Q_t$ , 高次电流谐波变化等。

(3) 负荷匹配。将采集到的负荷特征与每个家

庭的负荷特征指纹库进行对比,运用多元高斯模型进行负荷匹配,记录负荷种类、编号及  $P_i$ 。

### 2.2 需求响应能力在线聚合监测

基于上述低压电力负荷分解方法,获取底层居民负荷动作及可中断类型。基于同类电器特征相似的特点,对同一类型的电器功率进行由下至上的在线聚合,最终获得台区需求响应能力。

(1) 家庭负荷需求侧响应能力监测。针对辨识到的每一类空调、热水器等可中断负荷有功功率,计算  $t$  时刻家庭可中断负荷总功率。衡量  $t$  时刻家庭需求侧响应能力的模型  $L_1$  为:

$$x_i = \sum_{i=1}^M P_{t,i} / P_t \quad 1 \leq i \leq M \quad (17)$$

式中:  $x_i$  为  $t$  时刻家庭可中断负荷占总低压电力负荷的比重;  $P_{t,i}$  为  $t$  时刻第  $i$  种可中断负荷的有功功率;  $M$  为可中断负荷数量。

(2) 将步骤(1)计算出的家庭可中断负荷占比、家庭  $t$  时刻电力负荷有功功率上传至台区监控平台,实现台区级居民可中断负荷聚合,从而获得监测区域的总需求侧响应能力。其中,衡量  $t$  时刻同一馈线或同一变电站需求侧响应能力的模型  $L_2$  为:

$$y_k = \sum_{k=1}^K x_{t,k} P_{t,k} / \sum_{k=1}^K P_{t,k} \quad 1 \leq k \leq K \quad (18)$$

式中:  $y_k$  为  $t$  时刻同一台区下总可中断负荷占总低压电力负荷的比例;  $x_{t,k}$  为  $t$  时刻同一台区下第  $k$  个家庭可中断负荷占总低压电力负荷的比例;  $P_{t,k}$  为  $t$  时刻第  $k$  个家庭总有功功率;  $K$  为同一台区下的家庭总数。

台区负荷需求响应能力在线聚合监测流程如图2所示。基于NILM的台区级居民负荷需求响应能力在线聚合监测框架,可实现可中断负荷参与需求侧响应能力评估,为需求侧响应资源的规划和开发提供量化参考。

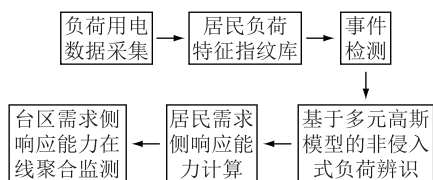


图2 台区负荷需求响应能力在线聚合监测流程

Fig.2 Online aggregation monitoring flow of load demand response capability in zone area

## 3 算例分析

### 3.1 算例概述

目前,国内外对于非侵入式负荷监测与分解的

研究主要集中在居民用户负荷分解。国外公认负荷监测与分解研究的有效数据集有 REDD 数据集、BLUED 数据集、AMPds 数据集、SmartStar 数据集等<sup>[9]</sup>。REDD 数据集由美国麻省理工学院提供,包含美国6个不同位置家庭的负荷数据。负荷数据的时间间隔横跨38 d,具有高、低2种不同采集频率的负荷数据。数据信息包括家庭总负荷的电压、电流和家庭总负荷功率,以及用于研究和验证的单个电力设备负荷功率。

### 3.2 家庭非侵入式负荷分解

基于Pycharm平台、Python语言对REDD数据集进行测试。硬件平台采用64位操作系统的HP Z800工作站,工作站的CPU为Intel Xeon,主频率为2.67 GHz,安装内存为24 G。由于REDD数据集采样间隔小,难以获得电流高次谐波特征量。以2个家庭为例,负荷分解结果如图3、图4所示。

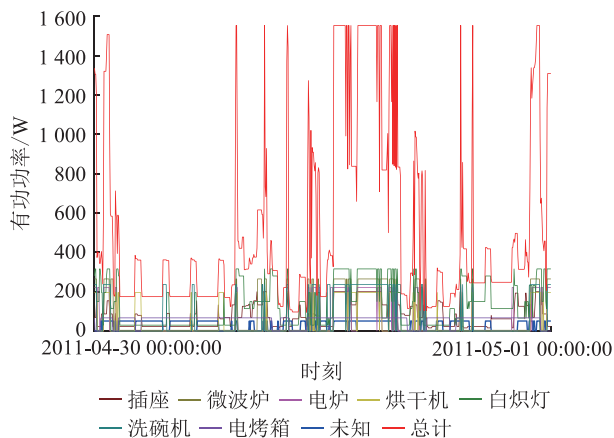


图3 家庭1负荷分解功率曲线

Fig.3 Load decomposition power of family 1

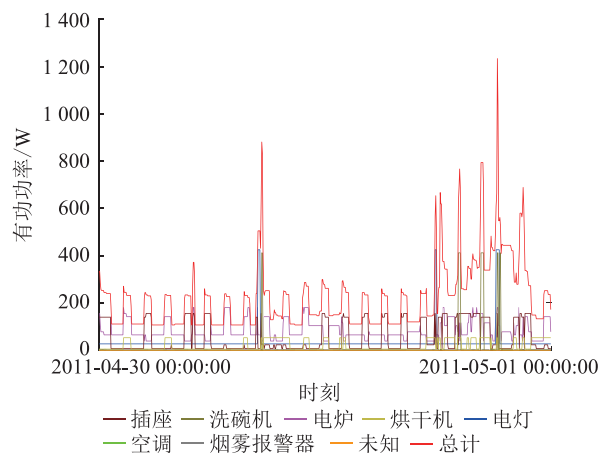


图4 家庭4负荷分解功率曲线

Fig.4 Load decomposition power of family 4

由图3、图4可知,家庭的总有功功率被分解为单个设备。此外,还能获得每个设备事件的开始和结束时间。



### 3.3 台区负荷需求响应能力在线聚合监测

使用3.2节分解结果进行测试,围绕5个家庭负荷供电的馈线开展技术验证。假设台区只有1条馈线,家庭内部包含电炉、电灯、电烤箱、插座、微波炉、烘干机、白炽灯、空调、烟雾报警器、电熔炉、变流装置等负荷。其中,电炉、白炽灯、电烤箱、电熔炉、空调被认为是可中断负荷。

图5、图6分别为辨识出的家庭1用电负荷构成及可中断负荷占比。由图5可知,家庭1的可中断负荷中,电炉占总负荷有功功率的14%,电烤箱占总负荷有功功率的4%,白炽灯占总负荷有功功率的21%。由图6可知,可中断负荷占总负荷有功功率的39%。可见,家庭1中的可中断负荷参与需求侧响应能力较强。

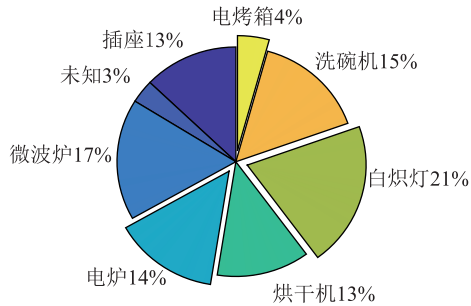


图5 家庭1用电负荷构成  
Fig.5 Power load composition of family 1

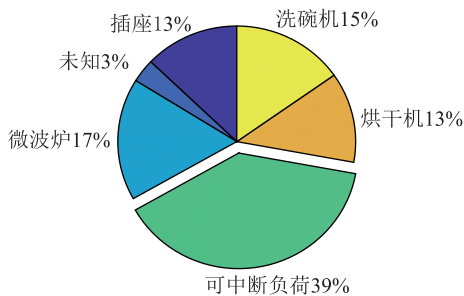


图6 家庭1用电负荷的可中断负荷占比  
Fig.6 Interruptible load proportion of family 1 power load

图7为家庭1可中断负荷占比的时间曲线。由图7可知,晚间可中断负荷占比较高,其参与调峰等需求侧响应能力强。

图8、图9分别为同一馈线上5个家庭当前用电负荷构成和可中断负荷占比,图10为该馈线可中断负荷占比的时间曲线。

由图8可知,此时电炉占总负荷有功功率的4%,电烤箱占总负荷有功功率的12%,电熔炉占总负荷有功功率的2%,白炽灯占总负荷有功功率的22%。由图9可知,可中断负荷占总负荷有功功率的40%。由图10可知,该馈线可中断负荷占比平均

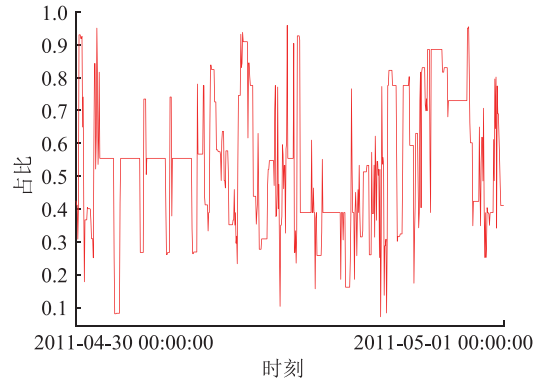


图7 家庭1用电负荷的可中断负荷占比时间曲线  
Fig.7 Interruptible load proportion time curve of family 1 power load

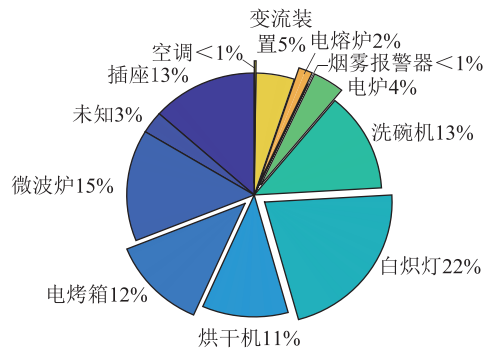


图8 馈线用电负荷构成  
Fig.8 Power load composition of the feeder

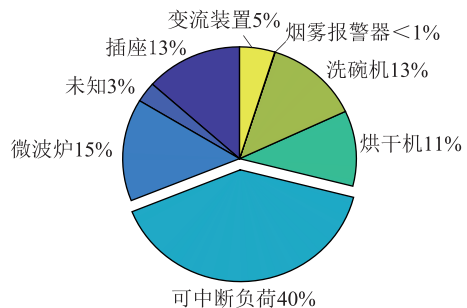


图9 馈线可中断负荷占比  
Fig.9 Interruptible load proportion of the feeder

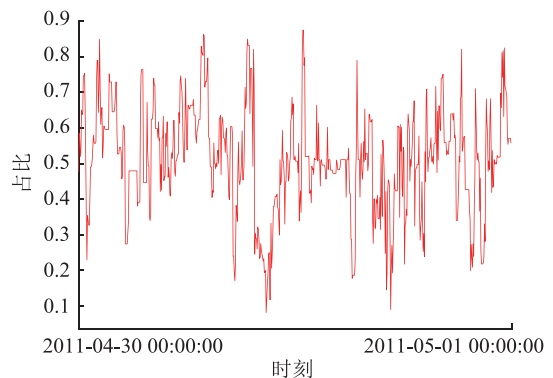


图10 馈线可中断负荷占比的时间曲线  
Fig.10 Interruptible load proportion time curve of feeder

为50%左右,晚间时段可达到70%左右。由馈线聚合结果可知,此馈线的5个家庭具有较强的可中断负荷参与需求侧响应的能力,且晚间可中断负荷占比较高,参与调峰能力较强。

#### 4 结语

文中提出了基于非侵入式负荷辨识的台区低压电力负荷参与需求侧响应能力在线聚合监测方法,实现了台区负荷资源参与需求响应能力的评估。首先,基于负荷工作时功率、电流等特征差异,建立负荷特征指纹库,提出了基于多元高斯模型的非侵入式负荷辨识方法,能够低成本、易操作地实现台区居民内部运行电器的状态监测。其次,在获取底层居民负荷动作和可中断类型后,提出由下至上的台区负荷需求响应能力在线聚合监测方法,在同一台区逐层聚合评估总需求侧响应能力,计算出相同类型的电器可中断负荷比例。该方法可以整合、评估海量用户侧泛在负荷资源,为负荷资源参与系统调峰、调频等智慧化利用提供了途径。未来,可以综合考虑家电负荷的物理模型,对其参与调峰、调频等一系列需求侧响应服务的能级进行评估。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019045)资助,谨此致谢!

#### 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.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang. Review and prospect for power system development and related technologies—a concept of three-generation power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):1-11.

[2] 李扬,王蓓蓓,李方兴. 灵活互动的智能用电展望与思考[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):2-9.  
LI Yang, WANG Beibei, LI Fangxing. Outlook and thinking of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):2-9.

[3] 李威,丁杰,姚建国. 智能电网发展形态探讨[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):24-28.  
LI Wei, DING Jie, YAO Jianguo. Views on smart grid evolution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 24-28.

[4] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化,2008(3):97-106.  
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems,2008(3):97-106.

[5] 田世明,王蓓蓓,张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术

术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3576-3589.  
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3576-3589.

[6] 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.  
YU Yixin, LIU Bo, LUAN Wenpeng. Nonintrusive residential load monitoring and decomposition technology [J]. Southern Power System Technology,2013,7(4):1-5.

[7] HART G W. Nonintrusive appliance load monitoring[J]. Proceedings of IEEE,1992,80(12):1870-1891.

[8] 程祥,李林芝,吴浩,等. 非侵入式负荷监测与分解研究综述[J]. 电网技术,2016,40(10):3108-3117.  
CHENG Xiang, LI Linzhi, WU Hao, et al. A survey of the research on non-intrusive load monitoring and disaggregation [J]. Power System Technology,2016,40(10):3108-3117.

[9] 苏梦. 峰谷分时电价下的用户需求响应研究[J]. 价值工程,2020,39(4):188-195.  
SU Meng. Demand response under peak and valley time-of-use electricity price[J]. Value Engineering,2020,39(4):188-195.

[10] 姚垚,张沛超,王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):4987-4998.  
YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(17):4987-4998.

[11] 陈泽兴,张勇军,陈伯达,等. 广义价格型需求侧响应下区域能源中心日前最优经济调度[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1873-1886.  
CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Optimal day-ahead economic dispatch for district energy centre considering the price based generalized demand response[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(6):1873-1886.

[12] 吴宛璐,韩帅,郭小璇,等. 计及空调负荷等多类型需求侧资源的虚拟电厂优化运行策略[J]. 电力需求侧管理,2020,22(1):10-14.  
WU Wanlu, HAN Shuai, GUO Xiaoxuan, et al. Optimized operation strategy of multi-type demand side resources in virtual power plant considering air conditioning load [J]. Power Demand Side Management,2020,22(1):10-14.

[13] 燕续峰,翟少鹏,王治华,等. 深度神经网络在非侵入式负荷分解中的应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):126-132.  
YAN Xufeng, ZHAI Shaopeng, WANG Zhihua, et al. Application of deep neural network in non-intrusive load disaggregation[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(1):126-132.

[14] ZHANG C Y, ZHONG M J, WANG Z Z, et al. Sequence-to-point learning with neural networks for non-intrusive load monitoring [C]//Thirty-second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-18). AAAI,2018:2604-2611.

- [15] CHEN Kunjin, WANG Qin, HE Ziyu, et al. Convolutional sequence to sequence nonintrusive load monitoring[J]. Journal of Engineering, 2018(17):1860-1864.
- [16] 王轲, 钟海旺, 余南鹏, 等. 基于 seq2seq 和 Attention 机制的居民用户非侵入式负荷分解[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1):75-83.  
WANG Ke, ZHONG Haiwang, YU Nanpeng, et al. Nonintrusive load monitoring based on sequence-to-sequence model with Attention mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1):75-83.
- [17] HE K, STANKOVIC L, LIAO J, et al. Non-intrusive load disaggregation using graph signal processing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3):1739-1747.
- [18] LI Ding, DICK Scott. Residential household non-intrusive load monitoring via graph-based multi-label semi-supervised learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4):4615-4627.
- [19] D'INCECCO Michele, SQUARTINI Stefano, ZHONG Mingjun. Transfer learning for non-intrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1419-1429.
- [20] 胡建强, 梅海锋, 方堃, 等. 电力需求侧温控负荷集群的聚合辅助服务[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2020, 19(1):9-16.  
HU Jianqiang, MEI Haifeng, FANG Kun, et al. Ancillary services provided by aggregated thermostatically controlled loads in power demand side[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2020, 19(1):9-16.
- [21] 高赐威, 李倩玉, 李慧星, 等. 基于负荷聚合商业的需求响应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17):78-86.  
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17):78-86.
- [22] 潘璠, 贾文昭, 许柏婷, 等. 广东电网需求侧响应潜力分析[J]. 中国电力, 2011, 44(12):21-25.  
PAN Fan, JIA Wenzhao, XU Boting, et al. Analysis on demand-side response potential of Guangdong power grid[J]. Electric Power, 2011, 44(12):21-25.
- [23] 王守相, 孙智卿, 孔繁钢, 等. 面向需求响应的建筑用能在线分解方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):1-6.  
WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, KONG Fangang, et al. Online building energy disaggregation orienting to demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):1-6.
- [24] 刘军会, 杨钦臣, 齐苗苗. 河南省主要行业电力需求侧响应削峰潜力评估[C]//河南省电机工程学会 2019 年优秀科技论文集. 2019.  
LIU Junhui, YANG Qinchen, QI Miaomiao. Evaluation of peak demand-cutting potential in response to power demand side response of major industries in Henan province[C]//2019 Excellent Science and Technology Essay Collection of Henan Electrical Engineering Society. 2019.
- [25] 朱明杰, 吴恒, 李敏蕾, 等. 基于细粒度分项电量数据的需求侧响应模型研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(21):48-52.  
ZHU Mingjie, WU Heng, LI Minlei, et al. Research on demand response model based on granular and itemized electric quantity data[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(21):48-52.
- [26] 刘继东. 电力需求侧响应的效益评估与特性分析[D]. 济南:山东大学, 2013.  
LIU Jidong. Benefit assessment and characteristics analysis of demand response[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [27] 汤奕, 鲁针针, 伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24):49-55.  
TANG Yi, LU Zhenzhen, FU Xiangyun. Demand response strategies for promoting consumption of distributed power generation with residential active loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24):49-55.
- [28] 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.  
ZHAO Shaodong, RAO Zhuyi, ZHANG Yunxiang, et al. Research on non-intrusive three-phase air conditioning identification based on multi-source character[J]. Electrical Automation, 2019, 41(5):41-44.
- [29] LIU Yu, GENG Guangchao, GAO Shan, et al. Non-intrusive energy use monitoring for a group of electrical appliances[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):3801-3810.
- [30] 何金松, 叶鹏, 张涛, 等. 面向电力系统应用的空调负荷研究综述[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2019, 15(4):343-349.  
HE Jinsong, YE Peng, ZHANG Tao, et al. Research overview of air conditioning load for power system application[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2019, 15(4):343-349.

#### 作者简介:



张潼

张潼(1993),女,硕士,助理工程师,从事电力系统调度自动化工作(E-mail:18951680-288@163.com);

于鹤洋(1997),男,博士在读,研究方向为电力负荷智慧应用;

田江(1981),男,硕士,工程师,从事调度自动化工作。

(下转第 65 页)

## Review of single-phase grounding fault active arc-suppression technologies in distribution network

WEI Xiaohui<sup>1</sup>, SHAO Wenquan<sup>2</sup>, CHENG Yuan<sup>2,3</sup>, XU Jiapeng<sup>2</sup>

- (1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China;
2. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Various forms of new energy, a large number of power electronic users are more and more connected to the distribution network, which is the irresistible development trend of distribution network. It leads to more and more reactive, active and harmonic components in the single-phase grounding fault current. The passive arc-suppression technology with arc-suppression coil still has the problem of large reactive component, active component and harmonic component in the single-phase grounding fault residual current. The active arc-suppression technology with active intervention by external injection is an effective way to solve such problems. The research status of active arc-suppression technology for single-phase grounding fault in distribution network is summarized. The structure and control algorithm of active arc-suppression device are mainly described. Firstly, the hardware structure of arc-suppression device is analyzed from the aspects of cost, advantages and disadvantages, connection mode, etc. Secondly, the advantages and disadvantages of voltage arc-suppression algorithm, current arc-suppression algorithm and comprehensive arc-suppression algorithm are compared. Finally, the hardware structure and control algorithm of active arc-suppression technology are prospected, the possible problems and possible research directions are given.

**Keywords:** single-phase grounding fault; active arc-suppression; distribution network; converter; passive arc-suppression

(编辑 钱悦)

(上接第 25 页)

## Online aggregation monitoring of low-voltage power load demand response capability based on non-intrusive load identification

ZHANG Tong<sup>1</sup>, YU Heyang<sup>2</sup>, TIAN Jiang<sup>3</sup>, FAN Haifeng<sup>4</sup>, CHEN Changyu<sup>2</sup>, GENG Guangchao<sup>2</sup>

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. State Grid Suzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215004, China;
4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The user side has a large number of load resources. The load has uneven capacity, scattered distribution, strong response potential and the ability to participate in grid regulation. Based on the difference in characteristics of power and current during load operation, a fingerprint database of load characteristics is established, and a non-invasive low-voltage load composition identification method for residential appliances based on a multivariate Gaussian model is proposed to achieve online decomposition of residential energy use. Based on the similar characteristics of similar electrical appliances, after obtaining the load actions and interruptible types of the bottom residents, an online aggregation monitoring method for the load demand response capability of the platform area from the bottom to the top is proposed. The REDD data set and the topology of a certain station area are used to test. The results show that the method has a better recognition of the residential load, and can better monitor the capacity of load resources participating in demand response. The method explores a way for participating in the intelligent utilization of system peak shaving and frequency modulation.

**Keywords:** non-intrusive; load identification; demand response; aggregation monitoring; online assessment

(编辑 吴楠)