

基于特征相似度的非侵入式用电负荷识别模型研究

通过监测采集非侵入式不同用电设备的电流、电压和有功功率等数据，并按其稳态和暂态过程定义出不同的特征参数建立标准特征库。利用被监测设备的实际用电负荷与标准特征库中各用电设备的稳态与暂态波形的相似度，构建出用电负荷识别模型。将在线实时监测的用电情况计算出来的稳态与暂态特征值作为模型输入，即可自动识别出用电设备的运行状态。

赵云 钱斌 王科 李秋硕 孙宇军/南方电网科学研究院

0 引言

对电力系统而言，负荷监测具有重要意义。传统的负荷监测一般需要在每一个被监视负荷处加装传感器等硬件设备，这种侵入式监测方法在安装和维护方面需要花费大量的时间和金钱，但仍满足不了不断发展的电力系统的需要。为此，提出了非侵入式负荷监测系统，只需要在电力入口处安装监测设备，通过监测该处的电压、电流等信号就可以分析得到负荷集群中单个负荷的种类和运行情况^[1-2]。非侵入式监测系统示意图如图1所示。



赵云/工程师

关键词/Keywords

非侵入式·
标准特征库·
稳态·
暂态·
相似度·

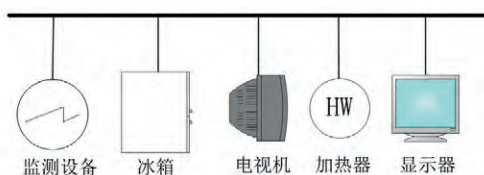


图1 非侵入式监测系统示意图

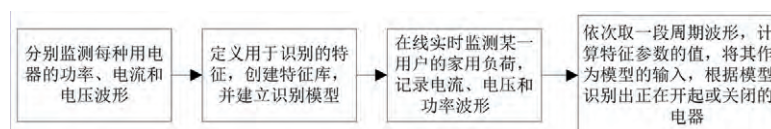


图2 非侵入式的用电设备监测与开闭状态识别流程

非侵入式负荷监测分析方法大致可以分为两大类：基于负荷稳态特征的分析方法和基于负荷暂态特征的分析方法。本文结合用电负荷的稳态和暂态的特征，建立一个识别模型来识别每一种用电设备的工作状态。根据用电设备的暂态与稳态特征的不同，选取负荷的有功功率、无功功率、稳态基波和谐波功率等来表征稳态的特征。选取负荷开启瞬间的有功功率波形相似度等来表征暂态特征。

1 基于特征相似度的非侵入式负荷识别

所采用的非侵入式负荷识别方法是结合用电负荷的暂态特征和稳态特征的相似度进行识别的。主要流程如图2所示。

具体包括以下几个步骤。

- 1) 首先对每一种用电设备进行监测，分别采集它们的电压、电流和有功功率的波形。
- 2) 提取稳态特征与暂态特征，并建立标准特征库。
- 3) 在线实时监测用户实际用电过程中产生的电流、电压和有功功率的波形。
- 4) 取一个周期的波形，首先判断该周期的暂态起始点并识别该波形对应的

负荷状态是稳态还是暂态,接着分别计算稳态和暂态的特征值,作为模型的输入。

5) 结合稳态相似度与暂态相似度,建立用电负荷识别模型。

6) 将步骤4中计算得到的实际用电负荷波形的稳态和暂态特征值作为模型的输入,根据模型的输出结果来识别出每一种用电设备的工作状态。

1.1 用电设备的稳态特征提取

用电设备负荷的稳态过程是指用电设备经过开起状态在其运行参数保持不变或者波动较小的过程。

稳态特征参数是指用电设备处于稳定运行状态时可提取的特征量,这里主要提取了5种用电设备在稳定运行状态下的特征参数^[3],分别为有功功率、无功功率、功率因数角、电流谐波畸变率^[4]和电流奇次谐波相对基波相位差。其中,前3种为用电设备的基本用电信息,后两种则作为辨识电器类型的基本特征参数。

根据有功功率等于瞬时功率在一个周期内的平均值,即

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \quad (1)$$

式中 φ_h 为第 h 次谐波电流滞后电压的相位。同理将无功功率定义为

$$\varphi = \arctg\left(\frac{P}{Q}\right) \quad (2)$$

功率因素角 φ 可以定义为

$$\varphi = \arctg\left(\frac{P}{Q}\right) \quad (3)$$

电流畸变率为

$$ITHD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \times 100\% \quad (4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

利用奇次谐波与基波的相位差可提取谐波的相位特征,即

$$\theta_i = \beta_h - \beta_1, \quad i = \frac{h-1}{2} \quad (5)$$

1.2 用电设备的暂态特征提取

用电设备负荷的暂态过程是指在其开起或者关闭过程中电器的用电情况从一种状态向另一种状态变化的过程。这个过程是很快,用时较短的只要0.02 s左右,用时较长的也只要零点几秒,关闭过程更加稳定快速。

暂态的过程虽然短暂,但是波动幅度最大。不同用电设备暂态的有功功率波形均有所不同,且差异较大,易于区分。因此,选取暂态的有功功率波形作为暂态特征。提取出的暂态特征主要用于识别模型中暂态波形相似度的计算,然而由于波形(曲线)之间的相似度会受其他因素影响,如两条曲线的形状是相似的,但因为存在时间上的平移而导致相似度变得很小,如图3所示。

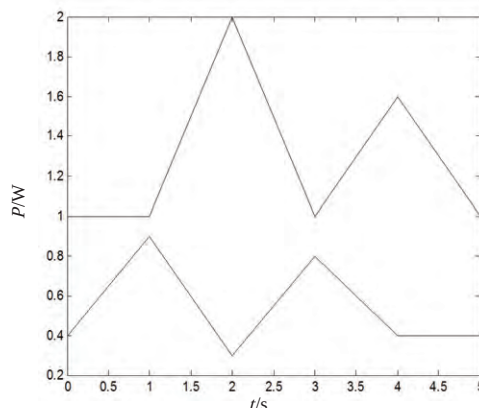


图3 两个存在时间上平移的曲线

对用电设备的有功功率波形采用基于分段直方图的信号序列处理方法^[5]。其步骤如下。

1.2.1 步骤1: 记录功率波形的时间序列

首先记录每种用电设备开起时的有功功率波形,提取出暂态部分。如图4所示。

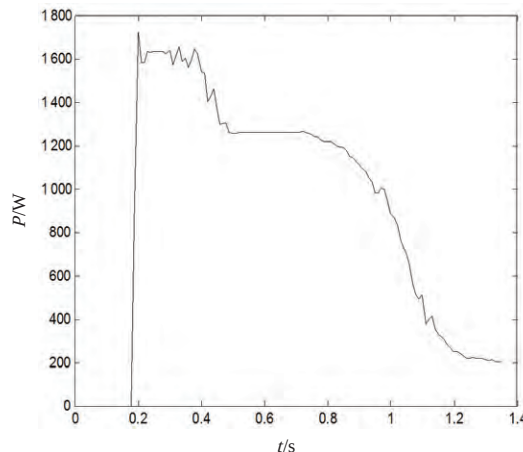


图4 某一用电器的暂态波形

将提取到的波形存储为时间序列形式, 记为

$$S_i = \{(t_0, x_0), (t_1, x_1), \dots, (t_n, x_n)\} \quad (6)$$

1.2.2 步骤2: 将时间序列按时间分段

将时间序列 S_i 的时间区间 $[t_0, t_n]$ 分为 m 段, 则原始的时间序列变为

$$S_i = \{s_1, s_2, \dots, s_m\} \quad (7)$$

1.2.3 步骤3: 分段做直方图统计

对每一段分别做直方图, 如图5所示。

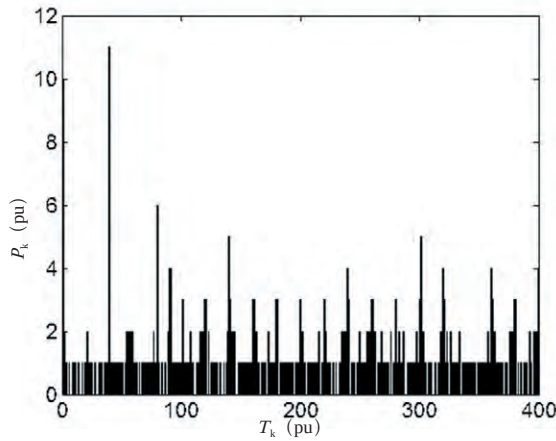


图5 用电设备的分段直方图

1.3 波形稳态段与暂态段的提取

1.3.1 步骤1: 判断暂态起始点

根据试验统计数据可知, 用电设备在开起瞬间能耗最大, 即监测到的瞬时负载曲线会在短时间内上升得很快。根据这一特性可判断用电设备是否开起。

定义: 以标准特征库中波形最长的用电设备的监测时间长度的2倍为一个周期, 分别记录第 i 个周期与第 $i+1$ 个周期的最大负载, 并计算这两者之间的差值。当这个差值超过某个设定的阈值时, 即可确定第 i 个周期中有用电设备正在开起。

接着在第 j 个周期中寻找开起点。具体方法为: 依次记录该周期中第 j 个采样时间点与第 $j+1$ 个采样时间点的瞬时负载, 并计算这两者之间的差值。当这个差值超过某个阈值, 则可判断后一采样时间点即为用电设备开起的时间。

1.3.2 步骤2: 识别并提取稳态和暂态波形

从开起时间点开始, 将每两个时间点之间的

功率差值记录在一个序列中, 当序列中出现取值均小于某个阈值的子序列的长度大于半个周期以上, 即可判断该子序列对应的时间段中用电负荷处于稳态, 并且该子序列中第一个元素对应的时间点为稳态起始点, 最后一个元素对应的时间点为稳态结束点。据此可以提取出每个取样周期的稳态段与暂态段, 并分别计算稳态特征值和暂态特征值。

1.3.3 步骤3: 判断用电设备的开闭状态

根据提取到的暂态波形序列长度, 由于用电设备关闭时产生的功率波动是突变的, 故当序列长度在10个采样点内时, 判断该用电设备属于关闭状态, 否则属于打开状态。

1.4 建立模型

模型输入为提取到的暂态波形和稳态波形, 稳态波形通过稳态特征指标计算, 转化为稳态特征 Y_i ; 暂态波形通过分段直方图转化为暂态特征; 分析待检测用电设备与特征库中用电设备的相似度, 即

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} r^w w_1 + \frac{1}{2} r^z z_1 \\ \frac{1}{2} r^w w_2 + \frac{1}{2} r^z z_2 \\ \vdots \\ \frac{1}{2} r^w w_n + \frac{1}{2} r^z z_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2} R_w + \frac{1}{2} R_z, \quad n = 5 \quad (8)$$

式中, R_w 为稳态波形相似度, 即

$$R_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + \text{Dist}(X_0, X_1)} \\ \frac{1}{1 + \text{Dist}(X_0, X_2)} \\ \vdots \\ \frac{1}{1 + \text{Dist}(X_0, X_n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 w_i [X_0(i) - X_1(i)]} \\ \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 w_i [X_0(i) - X_2(i)]} \\ \vdots \\ \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^5 w_i [X_0(i) - X_n(i)]} \end{bmatrix} \quad (9)$$

R_z 为暂态波形相似度, 即

$$R_z = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\text{Dist}(Y_0, Y_1)}}{m} \\ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\text{Dist}(Y_0, Y_2)}}{m} \\ \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\text{Dist}(Y_0, Y_n)}}{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\sum_{k=1}^M [Y_0(k)-Y_1(k)]^2}}{m} \\ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\sum_{k=1}^M [Y_0(k)-Y_2(k)]^2}}{m} \\ \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^m \frac{1}{1+\sum_{k=1}^M [Y_0(k)-Y_n(k)]^2}}{m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据计算结果 R 输出综合相似度最高的用电设备索引及其相似度。

2 仿真过程

2.1 单独对每一种用电设备进行监测

选取某一用户的5种用电设备：冰箱、电吹风、电视机、加热器和微波炉作为试验对象，单独监测并记录每一种用电设备从开启至稳定状态、从稳定状态到关闭过程中的有功功率、电流和电压的波形。图6为各种用电设备的有功功率波形。

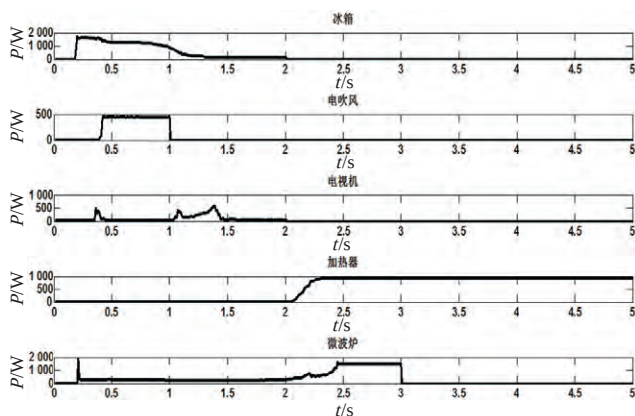
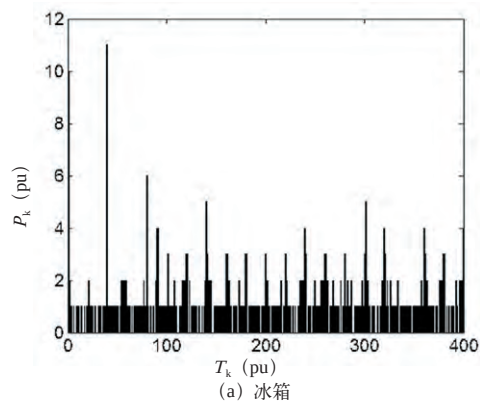
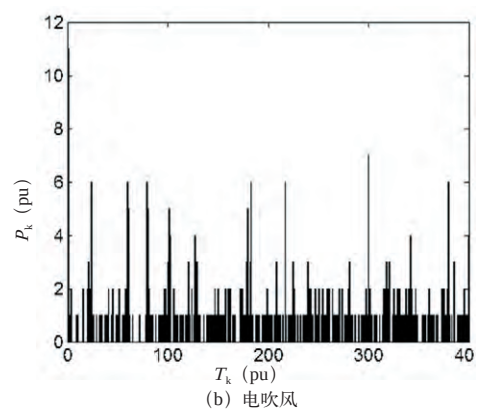
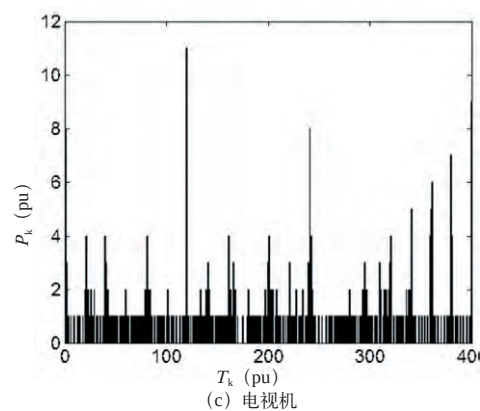
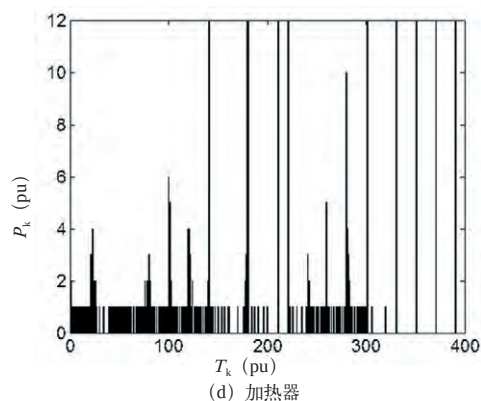


图6 每一种用电设备的有功功率波形

2.2 构建用电设备的稳态特征数据库与暂态数据库

将提取到的瞬时负载波形存储为向量格式，记为 $P_i = [x_0, x_1, x_2, \dots, x_n]$ 。先人为区分出该用电设备的暂态过程和稳态过程，然后根据上述基于稳态和基于暂态的特征提取的公式，计算出各指标的值，并分别保存至稳态特征库与暂态

特征库中，作为用电设备工作状态识别的标准，各用电设备的暂态特征如图7所示。



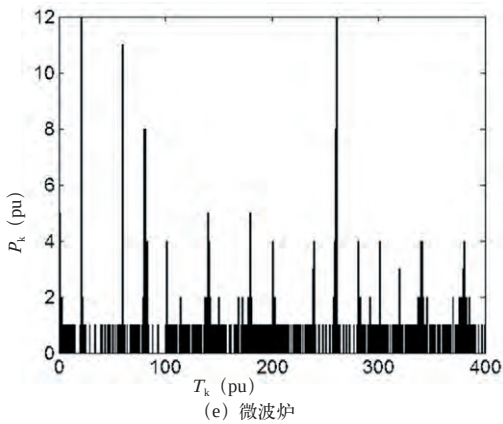


图7 标准特征库中各用电设备的暂态特征

2.3 在线实时监测用户用电负荷波形

图8为某用户的用电负荷监测波形，最上面为所有用电设备运行总负荷，即负载叠加负荷，下面分别为单个用电设备的运行负荷。

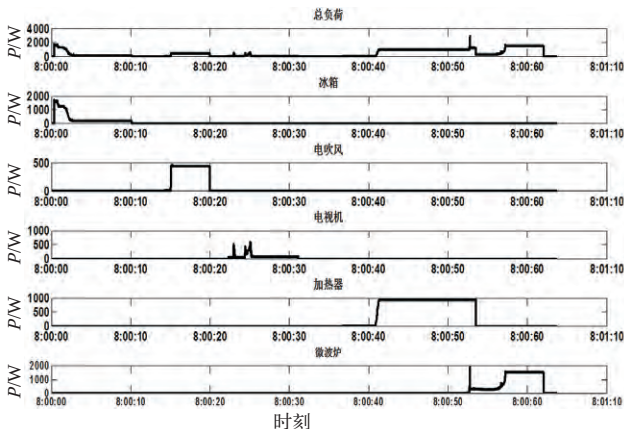


图8 用户实际用电负荷波形

2.4 模型计算与识别结果

根据在线实时监测到的用户用电负荷波形，按照本文的识别步骤，首先计算稳态和暂态的特征值，再导入模型进行计算，最终记录发生开启或者关闭事件的监测时间点，结果如下表所示。

表 用电设备开闭事件识别结果

时间	冰箱	电吹风	电视机	加热器	微波炉
8:00:00	开	关	关	关	关
8:00:10	关	关	关	关	关
8:00:14	关	开	关	关	关
8:00:20	关	关	关	关	关
8:00:22	关	关	开	关	关
8:00:31	关	关	关	关	关
8:00:36	关	关	关	开	关
8:00:52	关	关	关	开	开
8:00:53	关	关	关	关	开
8:00:62	关	关	关	关	关

将上表的识别结果与图8中的用户用电负荷曲线进行对比可以发现，识别结果与实际用电负荷曲线完全匹配，说明该识别方法准确度达到100%。

3 结束语

1) 提出的非侵入式用电负荷监测和识别方法研究，是通过建立特征库，结合稳态与暂态的特征相似度建立模型来识别用电设备运行状态的研究。通过试验证明，该方法的识别准确度很高。

2) 用电设备处于稳态时各指标都比较稳定，因此选取用电设备稳定状态时的基本用电信息：有功功率、无功功率和功率因素以及具有辨识性的特征：电流谐波畸变率、电流奇次谐波相对基波相位差来作为稳定状态的识别特征，识别效果较好。

3) 用电设备处于暂态时有功率波动很大，且不同用电设备的波形都有所差异，因此直接选取暂态波形的相似度作为暂态识别特征，也容易识别出用电设备的类型。

4) 将暂态特征相似度与稳态特征相似度结合起来考虑，并建立识别模型，能够避免依赖单一的暂态识别方法或者单一的稳态特征方法进行识别导致的误差。

参考文献

[1] 李坦, 杨洪耕, 高云. 智能电表家用负荷识别技术综述[J]. 供用电, 2011, 28(6): 39-42.

[2] 李静. 一种用于家用智能电表的负荷识别方法[J]. 现代电力, 2013, 30(5): 83-89.

[3] 雷冬梅. 非侵入式电路故障诊断及家用电器用电状况在线监测算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

[4] 黎鹏. 非侵入式电力负荷分解和监测[D]. 天津: 天津大学, 2009.

[5] 沈克爽. 基于分段直方图的时间序列相似度查询[J]. 计算机科学, 2004, 31(10): 228-232.

(收稿日期: 2015-05-26) EA

作者简介

赵云 (1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为电能计量。