

DOI: 10.7667/PSPC151380

基于 0-1 二次规划的非干预式负荷识别算法研究

林顺富¹, 赵伦加¹, 刘庆强², 李东东¹, 符杨¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 居民用电信息细化对于规划居民电器使用和降低电能消耗具有重要的意义。在分析居民负荷特性的基础上, 创新性地提出一种基于 0-1 二次规划的居民负荷识别算法, 并通过改造为连续化 0-1 二次规划求解过程中约束条件不易处理的缺陷。基于所提出的负荷识别算法, 可将单个居民家庭用电数据细分至负荷级别。测试结果表明选取合适的负荷识别指标, 可以获得较高的识别精度, 该算法可以应用于居民家庭中的非干预式负荷监测系统。

关键词: 负荷特性; 非干预式负荷监测; 负荷识别; 0-1 二次规划

A nonintrusive load identification method based on quadratic 0-1 programming

LIN Shunfu¹, ZHAO Lunjia¹, LIU Qingqiang², LI Dongdong¹, FU Yang¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Linyi Electric Power Company, Linyi 276000, China)

Abstract: The decomposed information of power consumption of household appliances is meaningful for scheduling the appliances and the reduction in home energy use. This paper proposes a novel load identification method based on quadratic 0-1 programming after a brief analysis on the residents load signature, and transforms the discrete model into continuous quadratic 0-1 programming model for overcoming the defects of complicated solving process. The power consumption of individual household could be decomposed into load level using the proposed algorithm. The recognition accuracy of load identification algorithms based on continuous quadratic 0-1 programming algorithm is tested, the results reveal that the algorithm could achieve high identification accuracy with appropriate load identification index, suitable for the NILM system of residential household.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207088).

Key words: load signature; nonintrusive load monitoring; load identification; quadratic 0-1 programming

0 引言

随着智能电网技术的发展和社会节能意识的提高, 居民家庭中单个电器的电能消耗信息对于规划电器使用和参与需求响应具有越来越重要的意义^[1-2]。居民用电监测系统能详细地显示各电器的用电信息, 有助于制定节能策略以及合理安排耗电电器的使用时间。可在不影响居民正常生活的前提下, 达到节省电能、减少电费支出的目的。研究表明, 居民用电信息的可视化可以有效降低 4%~15% 的电能消耗^[3-5]。

当前, 居民用电监测系统主要分为两大类: 第一类为分立式监测, 即安装分立式传感器(如智能插座)监测每个电器的运行状态、获取电器的用电信息; 但是, 分立式监测系统硬件成本高、通信网络复杂且不利于维护。另一类为集中式, 即在供电入户端安装监测设备获取家庭的总用电信息, 采用非干预式负荷识别技术 (Non-Intrusive Load Monitoring, NILM) 将总用电信息细化至负荷级别, 获取每个电器的电能使用情况。集中式居民用电监测系统硬件成本低、通信网络简单且便于维护。

NILM 技术由美国麻省理工大学 Hart 教授在 80 年代初提出^[6], 其算法基于由低频硬件获得的稳态宏观负荷特征, 如有功或无功等。近年来, 很多学者在 NILM 技术领域进行了较多的研究工作, 很多公司(如 Intel、Belkin、Onzo 和 Navetas 等)也投入

基金项目: 国家自然科学基金(51207088); 上海市科委科创项目(14DZ1201602); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900); 国网公司科技项目(SGRI-DL-71-14-004)

到 NILM 技术研究和产品开发中^[7-9]。文献[10-11]介绍了多种非干预式方法,非干预式方法可以分为稳态分析法(主要基于低频硬件)和瞬时分析方法(基于高频采样硬件)。稳态分析主要监测有功功率和无功功率,当电流发生变化,且超过设定的阈值时,计算有功功率和无功功率变化差值^[12]。谐波分析可以识别一些模糊的案例,特别是非线性负载^[13-14]。相关研究表明,采用由高频硬件获得的居民负荷稳态宏观特征和瞬态微观特征,可以获得更高的负荷识别精度。文献[15]提出一种基于 S 变换的居民负荷特征提取方法,可兼顾时域和频域的信号特征。文献[16]提出一种基于 BP 神经网络的居民负荷特征识别方法,可很大程度上降低计算复杂度。文献[17]提出一种基于遗传算法的负荷识别方法。

本文创新性地提出了一种新的识别算法——基于 0-1 二次规划的非干预式负荷识别算法。本算法可以集成于入户端的监测装置或传感器中,依据不同的负荷识别特性对设备开启状态进行识别。

1 居民负荷特性

负荷特性是用电设备耗电时特有的电气特征^[18]。不同的电器设备工作时其负荷特性具有或大或小的差异,如不同的设备消耗有功、无功不同;线性负荷与非线性负荷的电流曲线和谐波含量不同;电动类负荷与非电动类负荷 $V-I$ 特性不同。基于居民家庭入户端监测的电压和电流信号可以计算获得负荷特性指标以进行居民电器的识别。常见的居民负荷特性指标^[19]主要包括以下几种。

1.1 电流曲线特性

图 1 是由实测数据绘制的部分典型家用电器电流曲线。根据图形差异,提取以下 3 种数学特征作为不同电器电流曲线识别指标。

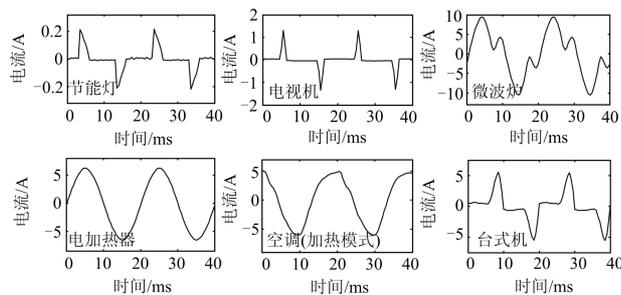


图 1 各用电设备稳态电流曲线

Fig. 1 Electrical appliance steady-state current graph

均方根:
$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i(k)^2} \quad (1)$$

幅值:
$$I_p = \max(i(k)), \quad 0 \leq k < N \quad (2)$$

波峰系数:
$$I_{\text{CF}} = \frac{I_p}{I_{\text{rms}}} \quad (3)$$

式中: I_{rms} 、 I_p 、 I_{CF} 分别为电流有效值、幅值、波峰系数(Crest Factor); $i(k)$ 表示第 k 个采样点的电流值。

1.2 谐波特性

谐波特性是负荷识别的重要指标。不同负荷的谐波含量存在很大差异,且各次谐波含有率都有各自的特点。谐波特性可通过快速傅里叶变换(FFT)将时域内电流信号转换为频域的频谱信号。可提取典型的谐波次数(2、3、5 次谐波)、THD 以及电流总谐波畸变率(THD_1) 作为家用电器谐波识别指标。 THD_1 计算公式如下。

$$\text{THD}_1 = \sqrt{\sum_{k=2}^H I_k^2} / I_1 \quad (4)$$

式中: I_k 为 k 次谐波电流有效值; I_1 为基波电流有效值。

1.3 PQ 特性

PQ 特性是描述用电设备用电行为最常用的指标。式(5)为提取用电设备有功功率和无功功率常用的算法。

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos(\Phi_k) \quad (5)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin(\Phi_k)$$

式中: U_k 和 I_k 分别表示 k 次谐波电压和电流有效值; Φ_k 为 k 次谐波相位差; k 为谐波次数。

1.4 瞬时功率波形特性

瞬时功率波形定义为瞬时电压与瞬时电流的乘积,如式(6)所示。

$$p(t) = u(t) \times i(t) \quad (6)$$

图 2 是利用电压、电流数据绘制的瞬时功率波形。根据波形可以提取以下两种识别指标。

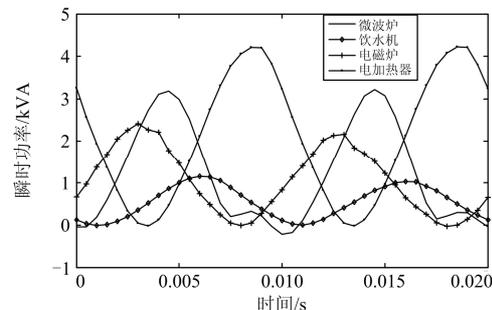


图 2 各用电设备瞬时功率对比图

Fig. 2 Instantaneous power waveforms of typical residential appliances

$$\text{双峰面积: } S_{pw} = \int_0^T p(t)dt = \frac{T}{N} \sum_{k=0}^N p(k) \quad (7)$$

$$\text{幅值: } P_p = \max(p(k)), \quad 0 \leq k < N \quad (8)$$

1.5 V-I 特性

图 3 是部分家用电器的 V-I 曲线。本文提出了 3 项识别指标用于家用电器 V-I 曲线的识别: 交叉点个数、V-I 曲线中最高点和最低点连线的斜率(中心线)和封闭曲线所包围的面积。

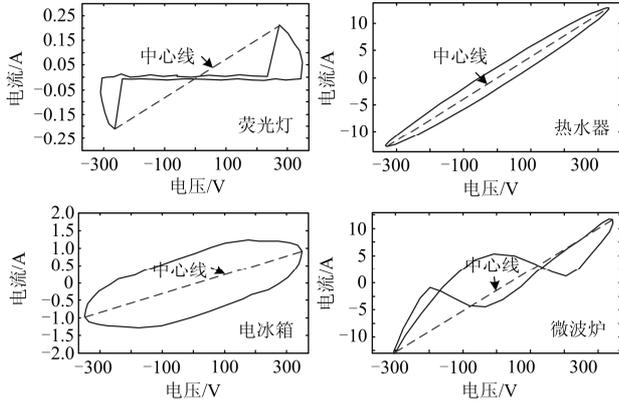


图 3 各设备 V-I 曲线图

Fig. 3 V-I curves of each appliance

2 负荷识别方法

2.1 0-1 二次规划算法原理

0-1 二次规划算法^[20]的表达式为

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \frac{1}{2} x^T H x + c^T x \\ \text{s.t. } &\begin{cases} A x \leq b, A_1 x = b_1 \\ C(x) \leq 0, C_1(x) = 0 \\ x \in \{0, 1\} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $f(x)$ 为二次方程; H 为 $n \times n$ 阶的矩阵, $c \in R^n$ 。 A , b , A_1 和 b_1 均为矩阵; $C(x)$ 和 $C_1(x)$ 为非线性矩阵函数。

2.2 负荷识别算法

基于 0-1 二次规划的非干预式负荷识别算法原理如下。

已知进线端节点下所有电器设备的负荷特性矩阵为

$$\Psi = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \cdots & \psi_{1N} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \cdots & \psi_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \psi_{M1} & \psi_{M2} & \cdots & \psi_{MN} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: ψ_{ij} 为 j^{th} ($j=1, 2, 3, \dots, N$) 设备的 i^{th} ($i=1, 2, 3, \dots, M$) 负荷特性识别指标值; N 表示所有电器的

数量; M 表示所选用的负荷特征个数。

实测数据获得的特征矩阵:

$$Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_M]^T \quad (11)$$

所求状态相量:

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N]^T \quad (12)$$

Y 为基于入户端实测数据提取出的负荷识别指标矩阵, y_i ($i=1, 2, 3, \dots, M$) 表示所选取的 i^{th} 识别指标值; X 为开关事件过程中负荷开关状态向量, 表示 j^{th} 设备的开关状态, $x_j \in \{0, 1\}$ (0/1 分别表示电器的关和开状态)。

假设检测到开关事件, 开关事件前入户端实测数据与事件后实测数据差值 Y' 可表示为

$$Y' = [y'_1, y'_2, \dots, y'_M]^T = \Psi X \quad (13)$$

基于差值矩阵 Y' 与待求矩阵 ΨX 的误差矩阵 ε 为

$$\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M]^T \quad (14)$$

$$\varepsilon_j = (y'_j - \sum_{i=1}^N \psi_{ji} x_i) \quad (15)$$

因此, 主要问题即为求解家用电器状态矩阵 X , 使得 ε 最小。

上述求解问题可以转换为下述问题的求解。

目标函数用矩阵表示

$$Y = Y' + \varepsilon = \Psi X + \varepsilon \quad (16)$$

约束条件

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq 1 \quad x_i \in \{0, 1\} \quad (17)$$

其中: Y 为 $M \times 1$ 阶向量, M 为对应某类负荷识别指标个数; X 为 $N \times 1$ 阶状态向量, N 为数据库负荷总数; $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M]^T$ 为 $M \times 1$ 阶向量; Ψ 为 $M \times N$ 阶负荷识别指标值矩阵。

由于 Y 是冗余的测量, 因此不能直接根据上述方程组进行求解(如果不考虑误差, 方程组(16)无解, 因为方程的个数多于未知数的个数), 但可以找到与方程组(16)最接近的解。可以使得上述 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M]^T$ 方差最小来确定参数。将冗余的方程组转化下面的求极小值问题:

$$\begin{aligned} \min J &= \varepsilon^T \varepsilon = \\ &(Y - \Psi X)^T (Y - \Psi X) = \\ &Y^T Y - 2Y^T \Psi X + \frac{1}{2} (X^T \Psi^T \Psi X) \end{aligned} \quad (18)$$

公式(18)化简过程中, $Y^T \Psi X$ 与 $X^T \Psi^T Y$ 均为一行一列的矩阵, 因此可合并为 $2Y^T \Psi X$ 。

因此上述问题转化为 0-1 二次规划问题, 其数学模型如式(19)所示。

$$\begin{cases} \min J = Y^T Y - 2Y^T \Psi X + \frac{1}{2}(X^T \Psi^T 2\Psi X) \\ \sum_{i=1}^N x_i \leq 1 \\ x_i = \{0,1\} \end{cases} \quad (19)$$

由于约束条件是 0-1 规划问题，所以求解上述规划问题只能用离散方法。离散算法是从设计变量的离散特性出发直接求解整数规划。传统的离散方法大多属于组合算法，如穷举法、隐枚举法等。这类算法能准确地找到问题全局最优解，但随着问题规模的增大，其计算代价很大。另一种是离散的启发式算法，如遗传算法，这类方法的主要缺点是不能很好地处理约束，而且很容易出现过早收敛问题。而连续化方法则不存在上述问题^[21]，因此将上述问题转化为连续化方法进行求解。

式(19)中的约束条件 $x_i = \{0,1\}$ 为离散型，将其进行连续化处理，等价替换为 $\sum_{i=1}^P a_i(x_i - x_i^2) = 0$ 且 $0 \leq x_i \leq 1$ ，将式(19)改造为连续化求解模型，如式(20)所示。

连续化方法求解等价模型：

$$\begin{cases} \min J = Y^T Y - 2Y^T \Psi X + \frac{1}{2}(X^T \Psi^T 2\Psi X) \\ \sum_{i=1}^P x_i \leq 1 \\ \sum_{i=1}^P a_i(x_i - x_i^2) = 0 \\ 0 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

2.3 开关事件检测

通过开关事件的检测，判断何时需要计算基于实测数据的负荷识别指标矩阵 Y 。开关事件的检测主要有两种方法：开关瞬时电压^[20]和滑窗型双边累积求和(CUSUM)^[23]。本文选取 CUSUM 方法检测开关事件。CUSUM 是一种时序分析技术，适用于变化检测。其原理如下，定义两个求和变量 g_k^+ 和 g_k^- ：

$$\begin{aligned} g_k^+ &= \max\{0, g_{k-1}^+ + x_k - (\mu + \beta)\}, k = 1, 2, 3, \dots \\ g_k^- &= \max\{0, g_{k-1}^- + x_k - (\mu + \beta)\}, k = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (21)$$

式中： μ 表示当前时刻的平均值； β 为噪声信号；下标 k 表示第 k 个采样点。

2.4 算法识别流程

将本文所提的 NILM 算法嵌入到入户端的监测装置中，以实现非干预式负荷监测。图 4 为算法识别流程。

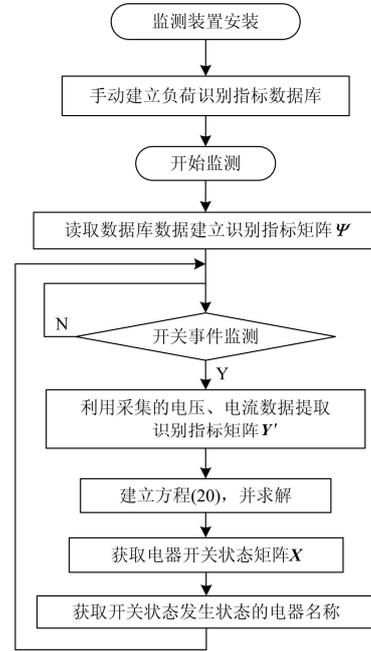


图 4 采集数据处理流程

Fig. 4 Processing procedure of the recording data

首先，当完成了监测装置的安装，就需要建立整个家庭中家用电器识别指标数据库，数据库的建立通过手动注册的方式完成。检测开始时，从数据库中读取每个电器的识别指标，建立识别指标矩阵 Ψ 。通过 CUSUM 算法检测开关事件，当检测到开关事件，根据采集到的电压、电流信号获取开关事件前后信号变化量，提取各项识别指标值，建立差值矩阵 Y' 。通过求解式(20)中的矩阵 X ，即可识别出此刻开关状态发生变化的家用电器。

3 负荷识别算法测试及实例分析

3.1 算法测试

为测试连续化 0-1 二次规划算法求解的精确度，在实验室搭建测试平台如图 5，选取荧光灯、微波炉、电加热器、热水器、饮水机和电磁炉六种电器设备作为测试对象，电器并联连接，并通过总开关接入电网。总开关处电压和电流数据使用 Hioki 公司的录波仪记录。分别依据以上负荷特性指标进行负荷识别测试。

将采集的数据以每 5 s 的数据作为一组测试对象，选取 100 组数据。结合第 2 节中的 6 种识别特性：电流(I)、谐波(H)、有功和无功率(PQ)、 $V-I$ 曲线、瞬时功率(p)，在 Matlab 中对 100 组数据进行识别。假设能正确识别出 n 组数据，利用公式(22) 可以计算不同识别特性的识别精度 c 。每种识别特性的识别精度如表 1 所示。



图 5 实验室测试平台

Fig. 5 Experimental platform with five appliances

$$c = \frac{n}{100} \times 100\% \quad (22)$$

表 1 单个识别指标辨识结果

Table 1 Recognition accuracy of single identify indicator

电器	识别特性	精度/%	电器	识别特性	精度/%
荧光灯	I	92	电磁炉	I	94
	H	84		H	83
	PQ	97		PQ	95
	$V-I$	93		$V-I$	91
	p	90		p	92
微波炉	I	92	饮水机	I	92
	H	89		H	90
	PQ	93		PQ	96
	$V-I$	88		$V-I$	93
	p	91		p	90
电加热器	I	94	热水器	I	94
	H	83		H	86
	PQ	96		PQ	96
	$V-I$	94		$V-I$	92
	p	92		p	92

表 1 结果显示, 单个识别指标的识别效果不是很理想。本文所提算法中的负荷特征矩阵 Ψ 可包含多个识别特性。利用上述实验方法, 测试多个识别特性结合时的识别效果, 如表 2 所示。

为简化实验复杂度, 测试对象选取荧光灯(非线性设备)、热水器(线性设备)、微波炉(多工作过程)和电磁炉(多工作模式)。在指标选择上, 选取表 1 中识别精度高, 并且将识别原理有差异(例如, I 、 PQ 、 p 3 个指标识别原理相似)的指标相结合。

为测试系统中设备数量对算法识别精度的影响, 扩大设备类型种类, 增加风扇、洗衣机、吸尘器和电视机, 所测试设备的种类 p 由 4 种到 10 种, 所给出的准确度是在不同设备种类情况下进行 $100 \cdot p$ 次测试的统计分析结果, 测试结果如表 3 所示。

表 2 多个识别指标辨识结果

Table 2 Recognition accuracy of multiple identify indicators

电器	识别特性	精度/%	电器	识别特性	精度/%
荧光灯	$I+H$	92	电磁炉	$I+H$	94
	$PQ+H$	94		$PQ+H$	94
	$PQ+V-I$	98		$PQ+V-I$	95
	$PQ+H+V-I$	98		$PQ+H+V-I$	94
	ALL	98		ALL	97
微波炉	$I+H$	90	热水器	$I+H$	92
	$PQ+H$	92		$PQ+H$	95
	$PQ+V-I$	93		$PQ+V-I$	96
	$PQ+H+V-I$	96		$PQ+H+V-I$	95
	ALL	97		ALL	98

表 3 不同种类设备下负荷识别算法辨识结果

Table 3 Recognition accuracy of load identification algorithms of different types of equipments

数量	识别特性	精度/%	数量	识别特性	精度/%
4	$I+H$	94	8	$I+H$	90
	$PQ+H$	92		$PQ+H$	91
	$PQ+V-I$	94		$PQ+V-I$	89
	$PQ+H+V-I$	96		$PQ+H+V-I$	92
	ALL	95		ALL	94
6	$I+H$	94	10	$I+H$	90
	$PQ+H$	93		$PQ+H$	88
	$PQ+V-I$	93		$PQ+V-I$	91
	$PQ+H+V-I$	95		$PQ+H+V-I$	90
	ALL	92		ALL	93

由以上表格可以看出, 连续化 0-1 二次规划识别算法效果理想, 识别剪度高, 且适用于识别设备种类数较多的情况。说明本算法适合应用于 NILM 系统中, 实现居民用电的集中式监测。

3.2 实例分析

为了进一步验证所提算法的可行性, 在实验室环境下搭建多个家用电器的测试平台, 检测算法在实际环境下的应用效果。以 5 种电器设备的实际运行过程为例进行讨论。5 种电器设备分别为风扇、饮水机、台灯、微波炉和电加热器, 其运行共包括 10 种开关事件, 表 4 为开关事件序列。实验过程的有功功率 RMS 曲线如图 6 所示, 其中, OE(Operation Event) 表示设备开关事件。

表 4 测试过程中 10 种开关事件

Table 4 Ten operation events during the test

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
风扇 ↑	饮水机 ↑	台灯 ↑	电加热器 ↑	微波炉 ↑
(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
饮水机 ↓	微波炉 ↓	风扇 ↓	电加热器 ↓	风扇 ↓

注: ↑ 表示设备开启; ↓ 表示设备关闭。

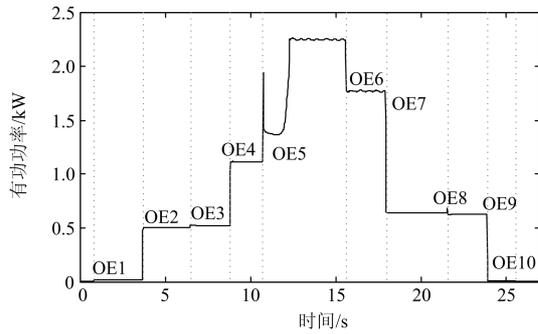


图 6 测试设备电流 RMS 和事件列表

Fig. 6 RMS curve of the active power and OE No.

对图 5 的测试数据应用双边累积和(CUCUM)算法监测开关事件(OE),一旦检测到开关事件,提取负荷识别指标并建立方程组(20),利用连续化 0-1 二次规划算法对引起事件的电器进行识别,识别结果如图 7 所示。例如,OE6 的识别结果为饮水机关闭。

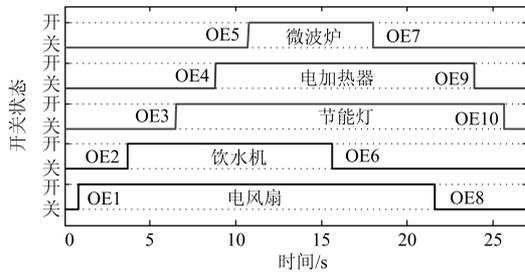


图 7 电器设备运行行程识别结果

Fig. 7 Detected operation events of appliances

一旦检测到开关事件,可以计算出设备消耗的电能,由电压和开关事件前后的电流差计算得出。表 5 为测试计算精度。可以看出,算法计算误差很小,适合应用于家庭能量监测系统。

4 结论

(1) 针对传统监测系统成本高、通信网络复杂、安装难度大等问题进行改善研究,提出基于连续型 0-1 二次规划算法的非干预式负荷监测系统,在一定程度上解决了传统监测系统的问题。

表 5 电能消耗测试误差

Table 5 Power consumption measurement accuracy

电器	有功电能/Ws	测试电能/Ws	误差/%
电风扇	347.0	345.7	-0.37
节能灯	190.4	190.0	-0.21
饮水机	5717.5	5664.0	-0.94
电加热	9063.9	9000.0	-0.70
微波炉	8108.4	8175.2	0.82
总电能	23425	23374.9	-0.21

(2) 基于离散 0-1 二次规划算法,提出了连续型 0-1 二次规划算法,解决传统算法不易求解的问题。

(3) 针对提出的连续型 0-1 二次规划算法进行算例验证,结果表明,设备识别精度大于 90%,设备电能消耗计算误差在 1%以下,输出信息对于用户规划设备使用是有帮助的。本算法具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] BALASUBRAMANIAN K, CELLATOGLU A. Improvements in home automation strategies for designing apparatus for efficient smart home[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(4): 1681-1687.
- [2] 阳小丹,李扬. 家庭用电响应模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 51-56.
YANG Xiaodan, LI Yang. Research on household electricity response mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 51-56.
- [3] 孙中权. 电力节能技术的研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 227-231.
SUN Zhongquan. Research and application of power saving technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 227-231.
- [4] BORSTEIN J, BLACKMORE K. In-home display units: an evolving market, part 1[R].
- [5] 彭显刚,赖家文,陈奕. 基于聚类分析的客户用电模式智能识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 68-73.
PENG Xiangang, LAI Jiawen, CHEN Yi. Application of clustering analysis in typical power consumption profile analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 68-73.
- [6] HART G W. Prototype nonintrusive appliance load monitor[R]. MIT Energy Laboratory Technical Report, and Electric Power Research Institute Technical Report, 1985.
- [7] GAO P F, LIN S F, XU W. A novel current sensor for home energy use monitoring[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2021-2028.
- [8] CHANG H H, CHEN K L, TSAI Y P, et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 764-771.
- [9] LEE K D. Electrical load information system based on non-intrusive power monitoring[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [10] ZEIFMAN M, ROTH K. Nonintrusive appliance load

- monitoring: review and outlook[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2011: 239-240.
- [11] LIANG J, NG S, KENDALL G, et al. Load signature study — part I: basic concept, structure, and methodology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 551-560.
- [12] LESIEUTRE B C. Improving dynamic load and generator response performance tools[J]. Ernest Orlando: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.
- [13] WICHAKOOL W, AVESTRUZ A T, COX R W, et al. Modeling and estimating current harmonics of variable electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2803-2811.
- [14] PAN Aiqiang, ZHOU Jian. Power quality analysis and harmonic tracing in city grid based on big monitoring data[C] // 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 15-18 June, 2015.
- [15] MARTINS J F, LOPES R, LIMA C, et al. A novel nonintrusive load monitoring system based on the S-Transform[C] // Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2012 13th International Conference, 2012: 973-978.
- [16] LIU Y H, TSAI M S. A novel signature extraction method for the development of nonintrusive load monitoring system based on BP-ANN[C] // Computer Communication Control and Automation, 2010 International Symposium, 2010: 215-218.
- [17] LEUNG J S K, NG K S H, CHENG J W M. Identifying appliances using load signatures and genetic algorithms[C] // International Conference of Electrical Engineering, Hong Kong, China, July, 2007.
- [18] 李东东, 崔龙龙, 林顺富. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 123-129.
- LI Dongdong, CUI Longlong, LIN Shunfu. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 123-129.
- [19] 郑小霞, 刘庆强, 林顺富. 面向非干预式负荷监测的居民负荷微观特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 62-70.
- ZHENG Xiaoxia, LIU Qingqiang, LIN Shunfu. Research of the microscopic signatures of residential loads for NILM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 62-70.
- [20] 冯仁宇. 二次规划的全局最优性条件、算法及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- FENG Renyu. Research on global optimality conditions, algorithms and applications of quadratic programming[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [21] 李艳艳. 0-1 规划问题的连续化方法研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- LI Yanyan. Continuous approaches to 0-1 programming problems with applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [22] DUARTE C, DELMAR P, BARNER K, et al. A signal acquisition system for non-intrusive load monitoring of residential electrical loads based on switching transient voltages[C] // Power System Conference, 2015 Clemson University, 10-13 March, 2015: 1-6.
- [23] PAGE E S. Continuous inspection scheme[J]. Biometrika, 41(1/2): 100-115.
-
- 收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2015-12-04
- 作者简介:
- 林顺富(1983-), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 从事智能电网用户侧方向的研究(电能质量分析、智能用电及节能等); E-mail: shunfu.lin@163.com
- 赵伦加(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量;
- 刘庆强(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为智能用电。E-mail: liuqingqianglqq@163.com
- (编辑 葛艳娜)