

基于遗传优化的非侵入式居民负荷辨识算法^{*}

祁兵 韩璐

(华北电力大学 电气与电子工程学院 北京 102206)

摘要: 负荷在线监测能够为电网及用户提供即时的用电信息,是支撑能效管理和负荷预测工作的有效手段。传统监测方法采用侵入式设计,难以大范围推广应用,因此非侵入式负荷监测方法(NILM)具有重要研究意义。负荷辨识是非侵入式负荷监测的关键,以典型居民负荷的特性分析为基础,提出了一种基于遗传优化的非侵入式居民负荷辨识算法。该算法基于负荷设备的负荷特性,包括有功功率和电流有效值,利用三种不同的编码方法构造判断负荷运行状态的适应度函数,通过遗传算法寻优,最终确定居民负荷的工作状态,并通过实测数据进行验证。实验结果表明,该算法能够实现居民用户负荷状态的有效辨识,且算法收敛速度较快,准确度高。

关键词: 非侵入式; 负荷监测; 居民负荷; 负荷辨识; 遗传算法

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2017)17-0011-07

A non-intrusive residential load identification algorithm based on genetic optimization

Qi Bing, Han Lu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Load online monitoring can provide real-time power consumption information for the grid and users, which is an effective method to support energy management and load forecasting work. Traditional method within intrusive mode is difficult to promote a wide range of applications, so non-intrusive load monitoring method (NILM) has important significance. Load identification is very important to NILM. Considering the residential load typical characteristic analysis, a non-intrusive residential load identification algorithm based on genetic optimization is proposed. The algorithm based on load characteristic, including active power and current effective value, uses three different encoding methods to structure fitness function, and ultimately determines the specific type of load by genetic optimization, and then, the effectiveness of the algorithm is verified by the actual sampling load data. Experimental results show that the algorithm can achieve residential load identification, and improves the speed of constriction and accuracy of the identification.

Keywords: non-intrusive, load monitoring, residential load, load identification, genetic optimization (GA)

0 引言

随着智能电网的发展,电力负荷中居民用户用电负荷所占的比重越来越大,作为电力负荷的重要组成部分,居民用户域负荷日益引起社会的广泛关注。居民用户域的负荷在线监测是实现居民用户用电可视化的基础,它有助于用户了解家庭内不同时段各电器设备的具体能耗情况,据此来制定合理的用电计划,完善能源消

费结构,促进能源有效利用,减少家庭电费开支。居民用户域负荷在线监测对推进整个社会的节能减排、缓解能源危机起着重要的作用^[1-2]。

电力负荷的在线监测分为传统的“侵入式”负荷监测和非侵入式负荷监测(Non-Intrusive Load Monitoring, NILM)。相较于侵入式负荷监测, NILM在不干预被监测系统内部的前提下实现对各用电设备运行状态和用电信息的在线监测,它只需要在被监测系统电力入口的配电板处安装用电信息采集装置,通过采集该处所有用电设备总的用电信息,并运用

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划资助项目课题(2016YFB0901104); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016MS13)

合适的数学分析计算方法进行处理和分析,结合不同用电设备的负荷特性,就能辨识并细化系统内各个负荷用电信息以及其运行状态,从而得到负荷集群中单个负荷的种类和运行情况^[3]。由于非侵入式负荷辨识具有投入少、设备少以及使用方便等特点,因此非常适用于居民用户用电负荷的辨识。

负荷辨识算法是NILM的核心内容,研究人员提出了很多不同的理论和算法。George. W. Hart教授首先提出了一种通过监测电力入口处所有用电设备总的有功功率和无功功率的变化量来辨识负荷的方法^[4]。Robertson等人采用小波变换技术,通过对几个未知的暂态信息进行分类的方法进行负荷辨识^[5]。文献[6]和文献[7]研究了NILM的数据提取方法和稳态负荷识别算法。由于负荷稳态特征存在局限性,利用暂态特征辨识成为研究重点^[8-11]。上述方法均是通过对暂态特征量的提取、转化来实现负荷辨识,但由于切入点比较单一,考虑到实际环境下暂态特征的不确定性,其准确度将受到影响,暂态、稳态特征结合的方法也受到了关注^[12-13]。随着智能算法的发展,有研究者利用智能算法进行负荷辨识的研究^[14-15]。

在已有研究的基础上,提出了基于遗传优化的非侵入式负荷辨识算法,利用实测负荷电流及电压数据,获得有功功率及电流有效值,通过遗传算法寻优,寻找最优解,最终确定电器的具体负荷类型。

1 非侵入负荷监测原理及负荷特性分析

非侵入式负荷监测方法是相对于侵入式方法提出的,其应用示意图如图1所示。

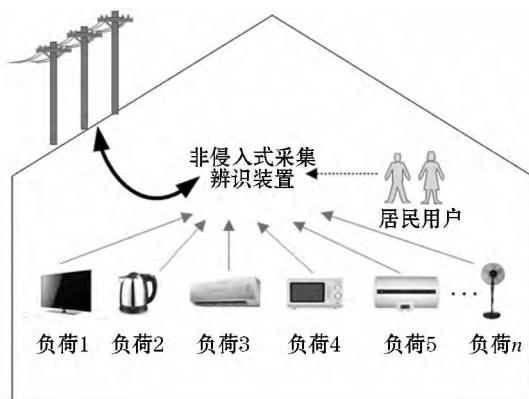


图1 非侵入式负荷监测方法应用示意图

Fig.1 Application schematic diagram of NILM

它只需要在被监测系统电力入口处安装监测终端设备,通过采集该处所有用电设备总的用电信息,利用居民负荷特性,并运用合理的数学分析计算方法对这些实测用电数据进行处理和分析,从而辨识并细化系统内各个负荷用电信息以及其运行状态,

得到负荷集群中单个负荷的种类和运行情况。

由于构成元件、功能等方面的差异,负荷设备在运行过程中都会表现出独特的用电特性,即负荷特性,包括有功功率、无功功率、谐波、电流有效值等^[16],是负荷辨识的主要依据。文中主要采用有功功率和电流有效值。

通过负荷的实际运行,文章对六种常用居民负荷特征进行测量,负荷分别是电扇、加湿器、微波炉、加热器、落地扇和电水壶。测量结果如图2所示。

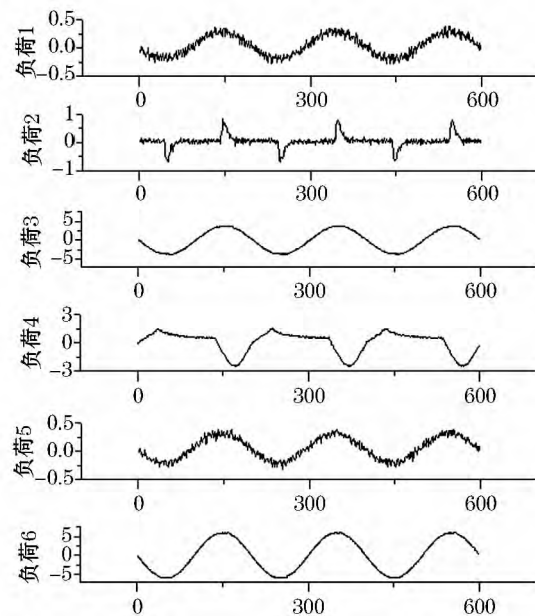


图2 六种负荷稳态电流波形图

Fig.2 Current waveforms of six load appliances

通过上述六种居民负荷的数据可以获得有功功率以及电流有效值,其计算方法如下:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \sum_{i=1}^{\infty} V_i I_i \cos \varphi_i \quad (1)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} I_i^2} \quad (2)$$

式中 P 是有功功率; I_{rms} 是电流有效值; V 、 I 分别是负荷的电压和电流; φ 是电压和电流的相位差; i 是谐波次数。计算得出六种负荷有功功率和电流有效值,如表1所示。

从表1中可反映出,不同负荷的有功功率值差别较明显,因此基于负荷的有功功率进行负荷辨识具有一定的可行性,但当负荷设备的有功功率值较接近时,易造成辨识结果偏差。

表1 六种负荷有功功率和电流有效值
Tab. 1 Active power and current effective value
of six load appliances

负荷	有功功率值/W	电流有效值/mA
负荷1	36	2.53
负荷2	24	2.91
负荷3	570	37.61
负荷4	173	16.12
负荷5	42	2.83
负荷6	9	60.48

基于上述原因,提出了利用有功功率及电流有效值相结合的负荷辨识方法,该方法考虑了负荷有功功率重叠的情况,可以提高负荷辨识的准确性。

2 基于遗传算法的负荷辨识方法

2.1 算法原理与实现流程

文中采集的实测数据是所有居民负荷总的用电数据,实际辨识需要快速准确,因此应利用遗传算法的快速寻优特性,可极大的简化数据相关性计算,减少计算量,且采用遗传算法能以较大概率找到全局最优,故本文采用遗传算法求解该最优化问题。

文章基于遗传优化的思想对有功功率和电流有效值两个负荷特征进行寻优搜索。通过采集负荷的用电数据,并对数据归一化处理;确定编码方案,定义适应度函数值,选择遗传算法参数;产生任意有功功率以及电流有效值叠加值的组合,对叠加值组合进行编码形成一个染色体个体;重复此过程直到满足个体数量要求,从而形成种群;然后从种群中以一定选择算法选择出优势个体并按一定的概率进行复制、杂交、变异算子等三种不同操作产生新一代种群个体。重复上述过程直至群体中存在个体达到给定的适应度要求。基于遗传算法的非侵入式负荷辨识的具体实现过程如图3所示。

2.2 遗传算法模型

由于有功功率和电流有效值量纲不一致,为了简化计算,对数据进行归一化处理。

在遗传算法中把一个问题的可行解,从其解空间转换到遗传算法所能处理的搜索空间的转换方法称为编码。负荷的状态是一个二值问题,因此采用二进制一维编码^[17-18],每个染色体对应一个负荷组合集。染色体编码方式则直接使用二进制表达方式,即“0”和“1”。若有 m 个负荷,则染色体长度 $L=m$,即染色体是一个长度为 m 的0和1字符串,每位对应一个相应的负荷状态,即当染色体中的某个基因为“1”时,表示该基因对应的负荷状态为运行;若为

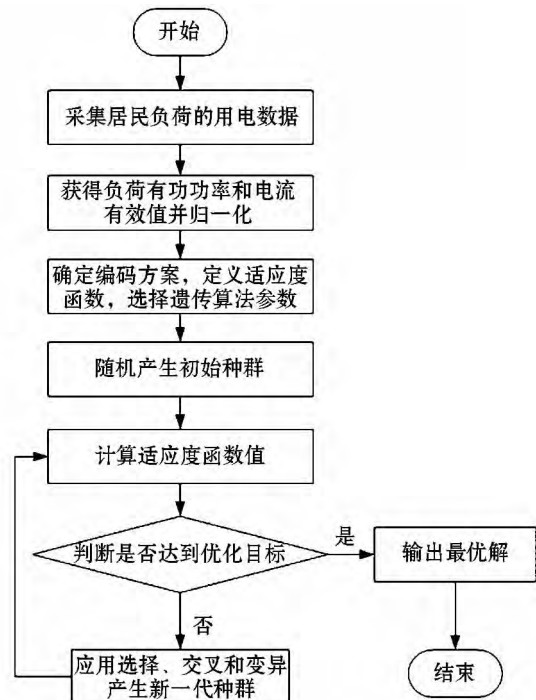


图3 算法实现流程

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

“0”时,表示该负荷状态处于关闭。随机产生 k 个长度为 m 的0、1字符串作为初始种群。

编码方案有三种:

(1) 染色体编码由实测总功率是否包含此负荷的有功功率值组成,即当负荷处于运行状态时,则实测总有功功率中包含此负荷的功率分量,如图4所示。

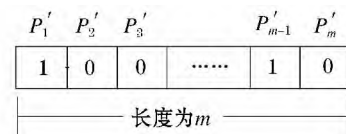


图4 染色体编码方案a

Fig. 4 Chromosome encoding of plan a

(2) 染色体编码由实测总电流有效值是否包含此负荷的电流有效值组成,即当负荷处于运行状态时,则总电流有效值中包含此负荷的电流分量,如图5所示。

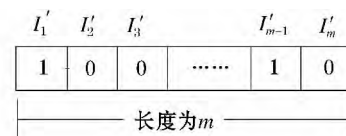


图5 染色体编码方案b

Fig. 5 Chromosome encoding of plan b

(3) 染色体编码由有功功率值和电流有效值数组组合编码两部分组成,如图6所示。

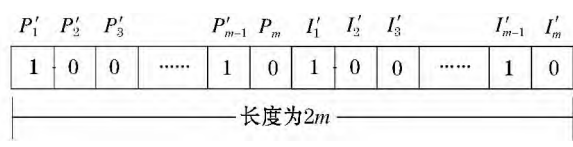


图 6 染色体编码方案 c

Fig. 6 Chromosome encoding of plan c

选择一个适当的适应度函数是遗传算法能否成功解决负荷辨识问题的关键,它直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。根据编码方案,适应度函数也有三种设置:

$$f(i, P, x) = \min(\sum_{i=1}^6 P_i x_i - P) \quad (3)$$

$$f(i, I_{rms}, x) = \min(\sum_{i=1}^6 I_{rmsi} x_i - I) \quad (4)$$

$$f(i, P, I_{rms}, x) = \min[\alpha \sum_{i=1}^6 P_i x_i + \beta \sum_{i=1}^6 I_i x_i - (\alpha P + \beta I)] \quad (5)$$

式中 P 代表实测的有功功率; I 代表实测的电流有效值; x_i 代表每一位的编码,为 0 或者 1; $f(i, P, x)$ 代表方案 a 的适应度函数; $f(i, I_{rms}, x)$ 代表方案 b 的适应度函数; $f(i, P, I_{rms}, x)$ 代表方案 c 的适应度函数。

个体的进化是在遗传算子的作用下完成的。最主要的遗传算子是选择、交叉和变异。文中采用的是转盘赌法的选择策略,每次随机的从有功功率和电流有效值的叠加组合中挑选一定数目的个体,并将其中适应度最高的选作父体;交叉采用的是均匀交叉策略,将两个父代染色体以一定的概率执行交叉操作,从而形成新一代的子染色体;变异采用的是比特翻转策略,即依突变概率随机将染色体的某位基因进行比特翻转(即 1 变成 0,而 0 变成 1)。采用总有功功率以及总电流有效值与实测数据差值最小相结合作为迭代终止条件。

3 算例分析

3.1 实验环境和实验数据

基于 LabVIEW 和信号采集卡的数据采集终端,采集系统运行过程中的电流、电压等数据。获取实测数据后,为了验证算法的有效性,用 MATLAB 编程实现,利用本文算法进行负荷分析及辨识。

3.2 实验参数设置

参数采样率 $f_s = 10 \text{ kHz}$,本文选用了 6 类样本,即负荷种类 $m = 6$,分别是小电扇、加湿器、微波炉、加热器、落地扇以及电水壶。实验中选用的 6 种典型负

荷能够验证算法的有效性。设置初始种群数为 30,染色体编码为 6 位和 12 位二进制码,最大繁殖代数数为 64。三种编码方案的参数设置如表 2 所示。

表 2 遗传算法参数

Tab. 2 Parameter of genetic optimization

参数	数值
遗传算法执行次数	64
群体大小	30
染色体长度	6 或 12
交叉概率	0.8
变异概率	0.03

3.3 实验结果

为了对比三种编码方案的有效性,对 a、b 和 c 三种编码方案分别进行实验仿真。

(1) 方案 a 仿真

当实测有功功率为 570 W 时,图 7(a) 显示识别结果为编码 9 号,即 [001000],可看出只有三号负荷编码为 1,即微波炉处于运行状态;当实测有功功率为 240 W 时,图 7(b) 显示识别结果为编码 54 号,即 [110101],可看出一、二、四和六号负荷编码为 1,即小电扇、加湿器、加热器和电水壶处于运行状态;同理当实测有功功率为 770 W 时,图 7(c) 辨识结果为加湿器、微波炉、加热器和

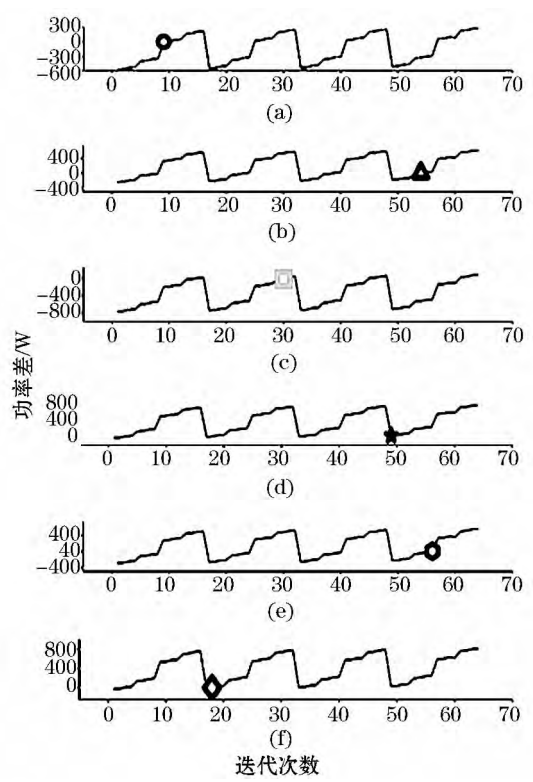


图 7 方案 a 仿真结果

Fig. 7 Simulation results of plan a

电水壶处于运行状态;当实测有功功率为60 W时,图7(d)辨识结果小电扇和加湿器处于运行状态;当实测有功功率为290 W时,图7(e)辨识结果小电扇、加湿器、加热器、落地扇和电水壶处于运行状态;当实测有功功率为33 W时,图7(f)辨识结果加湿器和电水壶处于运行状态。

(2) 方案b仿真

当实测电流有效值为38 mA时,图8(a)显示识别结果为编码9号,即[001000],可看出只有三号负荷编码为1,即微波炉处于运行状态;当实测电流有效值为118 mA时,图8(b)显示识别结果为编码54号,即[110101],可看出一、二、四和六号负荷编码为1,即小电扇、加湿器、加热器和电水壶处于运行状态;同理当实测电流有效值为80 mA时,图8(c)辨识结果为加湿器、微波炉、加热器和电水壶处于运行状态;当实测电流有效值为5.5 mA时,图8(d)辨识结果小电扇和加湿器处于运行状态;当实测有功功率为85 mA时,图8(e)辨识结果小电扇、加湿器、加热器、落地扇和电水壶处于运行状态;当实测有功功率为64 mA时,图8(f)辨识结果加湿器和电水壶处于运行状态。

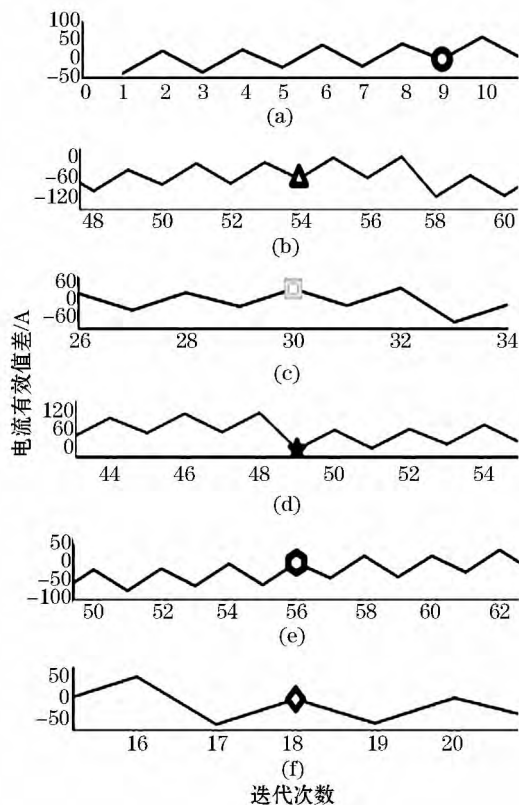


图8 方案b仿真结果

Fig. 8 Simulation results of plan b

(3) 方案c仿真

当实测有功功率为570 W,实测电流有效值为38 mA时,图9(a)利用有功功率显示识别结果为编码9号,即[001000001000],可得出,只有三号负荷处于开启状态,即微波炉;当实测功率为240 W,实测电流有效值为118 mA时,图9(b)显示识别结果为编码54号,即[110101110101],可看出一、二、四和六号负荷编码为1,即小电扇、加湿器、加热器和电水壶处于运行状态;同理当实测有功功率为770 W,实测电流有效值为80 mA时,图9(c)辨识结果为加湿器、微波炉、加热器和电水壶处于运行状态;当实测有功功率为60 W,实测电流有效值为5.5 mA时,图9(d)辨识结果小电扇和加湿器处于运行状态;当实测有功功率为290 W,实测有功功率为85 mA时,图9(e)辨识结果小电扇、加湿器、加热器、落地扇和电水壶处于运行状态;当实测有功功率为33 W,实测有功功率为64 mA时,图9(f)辨识结果为加湿器和电水壶处于运行状态。

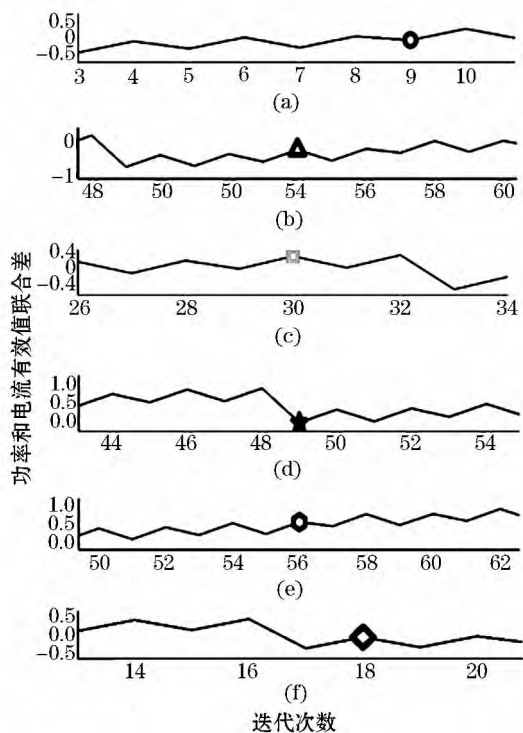


图9 方案c仿真结果

Fig. 9 Simulation results of plan c

图10显示了三种编码方案随着迭代次数的增加搜索到每代适应度值的变化情况。

表3是三种编码方案在相同实验情景下所达到辨识精度和收敛时间的比较。其结果是算法连续运行20次所得出的平均值。

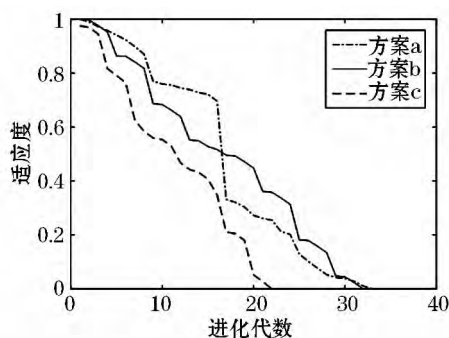


图10 三种方案的最佳适应度

Fig. 10 The best fitness curves of the three plans

从表3可以看出,方案c的辨识准确率明显高于另外两种方案,可以证明方案c利用有功功率和电流有效值综合判别负荷效果更好。在算法效率上,方案c的收敛时间最长,主要原因是方案c的编码长度长,且运算数据量大于其它两种,使得算法运行速率变慢。虽然优化所需的时间增加,但当不同种负荷有相同功率或者相同电流有效值时,方案c的识别精度更高。因此与其他两种方案相比,综合考虑辨识准确度和收敛时间,有功功率以及电流有效值叠加组合的方法辨识居民负荷组成具有一定的优势。

表3 三种编码方案的辨识准确率和收敛时间比较
Tab. 3 Comparison on the identification accuracy and convergence time of the three coding plans

方案	方案 a	方案 b	方案 c
辨识准确率 / %	88.407 4	75.153 8	92.517 2
收敛时间 t / s	0.47	0.56	0.72

4 结束语

针对居民用户负荷辨识问题,提出了一种基于遗传优化的非侵入式居民负荷辨识算法。该方法利用实测数据,获得有功功率及电流有效值特征参数,由于多种负荷设备同时运行时所获取的混合功率及电流为各设备单独运行时产生的特征功率及电流之和,在综合考虑有功功率及电流有效值约束条件的基础上,采用遗传算法,对有功功率及电流有效值的不同叠加组合值进行寻优,从而获得一个满足电流有效值和有功功率组合值的最优解。若实测功率包含某一种负荷的功率值和电流有效值,则此负荷投入运行,否则说明此负荷未投入运行。实验证明,该算法能较好地处理大规模复杂数据,且适合于解决多目标优化问题,能有效地解决非侵入式负荷辨识问题。通过三组实验,验证了综合有功功率以及电

流有效值叠加组合的方法能够正确的辨识出居民负荷的运行状态。

参考文献

- [1] Chang H, Chen K, Tsai Y, et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2012, 48(2): 764-771.
- [2] 黎鹏, 余贻鑫. 非侵入式电力负荷在线分解[J]. 天津大学学报, 2009, 42(4): 303-308.
Li Peng, Yu Yixin. Nonintrusive method for on-line power load [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(4): 303-308.
- [3] 郑小霞, 刘庆强, 等. 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, et al. Research of the microscopic signatures of residential loads for NILM [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 62-70.
- [4] HART G W. Prototype nonintrusive appliance load monitor [J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [5] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, Sr., "Wavelets and electromagnetic power system transients," IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 2, pp. 1050-1056, Apr. 1996.
- [6] A. I. Cole and A. Albicki, "Data extraction for effective non-intrusive identification of Residential power loads," in Proc. IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf., 1998: 812-815.
- [7] A. I. Cole and A. Albicki, "Algorithm for non-intrusive identification of Residential appliances," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., 1998: 338-341.
- [8] 牛卢璐. 基于暂态过程的非侵入式负荷监测[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 高云, 杨洪耕. 基于暂态特征贴度匹配的家庭负荷识别[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 54-59.
Gao Yun, Yang Honggeng. Household load identification based on transient characteristics with closeness matching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 54-59.
- [10] 张红梅, 孙洁, 许仪勋, 等. 基于暂态特征聚类的家用负荷识别[J]. 电子技术与软件工程, 2015, (6): 185-186.
Zhang Hongmei, Sun Jie, Xu Yixun, et al. Household load identification based on transient characteristics Clustering [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015, (6): 185-186.
- [11] 曲朝阳, 于华涛, 郭晓利. 基于开启瞬时负荷特征的家电负荷识别[J]. 电工技术学报, 2015, (S1): 358-364.
Qu Zhaoyang, Yu Huatao, Guo Xiaoli. The recognition of appliances instantaneous load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, (S1): 358-364.
- [12] 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]. 重庆大学, 2012.
- [13] 赵云, 钱斌, 王科, 等. 基于特征相似度的非侵入式用电负荷识别模型研究[J]. 电气应用, 2015, (S1): 199-203.
Zhao Yun, Qian Bin, Wang Ke, et al. Non-intrusive load identification model based on feature similarity [J]. Electrotechnical Application, 2015, (S1): 199-203.
- [14] 陶永芹, 崔杜武. 基于动态模糊神经网络算法的负荷辨识[J].

控制与决策, 2011, (4): 519-523, 529.

Tao Yongqin, Cui Duwu. Load identification of algorithm based on dynamic fuzzy granular neural network [J]. Control and Decision, 2011, (4): 519-523, 529.

[15] 郑宇. 神经网络在学生公寓用电负荷识别中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

[16] 刘庆强. 居民负荷特性研究及应用[D]. 上海: 上海电力学院, 2014.

[17] 朱红萍, 巩青歌, 雷战波. 基于遗传算法的入侵检测特征选择[J]. 计算机应用研究, 2012, (4): 1417-1419, 1426.

Zhu Hongping, Gong Qingge, Lei Zhanbo. Feature selection of intrusion detection based on genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, (4): 1417-1419, 1426.

[18] 刘勇国, 李学明. 基于遗传算法的特征子集选择[J]. 计算机工程, 2003, (6): 19-20, 50.

Liu Yongguo, Li Xueming, et al. Feature Subset Selection Based on Genetic Algorithm [J]. Computer Engineering, 2003, (6): 19-20, 50.

作者简介:



祁兵(1965—), 男, 硕士研究生, 教授, 博导, IEC PC118 工作组专家, 从事电力系统通信和智能用电技术研究。Email: qbing@ncepu.edu.cn



韩璐(1992—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统通信及非侵入负荷监测技术研究。
Email: free_hanlu@163.com

收稿日期: 2016-09-01; 修回日期: 2016-11-16
(王克祥 编发)

(上接第10页)

[5] 孙峰, 陈志国, 等. 频响法绕组变形试验相关标准的比较[J]. 变压器, 2016, 52(2): 36-39.

Sun Feng, Chen Zhiguo, et al. Comparison of winding deformation test with FRA in relevant standards [J]. Transformer, 2016, 52(2): 36-39.

[6] 曹小龙, 胡春梅, 曹小虎, 等. 变压器品类响应法测试结果的影响因素分析及改善[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 81-87.

Cao Xiaolong, Hu Chunmei, Cao Xiaohu, et al. Influencing Factors on Deformation Diagnosis of Transformer Windings [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 81-87.

[7] 王丰华, 李清, 金之俭. 振动法在线检测突发短路时变压器绕组状态[J]. 控制工程, 2011, 18(4): 596-599.

[8] Garcia. B, Burgos. J. C, Alongso. A. M. Transformer tank vibration modeling as a method of detection winding deformations part II: experimental verification [J]. IEEE Transaction on Power delivery, 2006, 21(1): 164-169.

[9] 谢坡岸. 振动分析法在电力变压器绕组状态检测中的应用研究[D]. 上海交通大学, 2008.

[10] 熊卫华, 赵光宙. 基于希尔伯特-黄变换的变压器铁心振动特性分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 9-13.

Xiong Weihua, Zhao Guangzhou. Analysis of Transformer Core Vibration Characteristics Using Hilbert-Huang Transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 9-13.

[11] Wu. S, Huang. W, Kong. F, et al. Extracting power transformer vibration features by a time-scale-frequency analysis method [J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2010, 2(1): 31-38.

[12] 李莉, 朱永利. 宋亚奇. 变压器绕组多故障条件下的振动信号特征提取[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 140-146.

Li Li, Zhu Yongli, Song Yaqi. Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 140-146.

[13] Norasage Pattanadech, Phethai Nimsanong. Effect of training methods in the accuracy of PCA-KNN partial discharge classification model [J]. IEEE Region Conference, 2014.

[14] 蒲杰, 院一敏. 电力变压器表面振动信号功率谱分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(1): 90-95.

Pu Jie, Yuan Yimin. Power spectrum analysis of surface vibration signal of the power transformer [J]. Electrical Measurement & Instrumentation. 2016, 53(1): 90-95.

作者简介:



夏玉剑(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向电力变压器在线监测。Email: xiayujia@sjtu.edu.cn

李敏(1969—), 男, 高级工程师, 长期从事输变电设备管理工作。

陈果(1975—), 男, 高级工程师, 从事输配电用电管理工作。

石同春(1984—), 男, 工程师, 从事工业工程管理工作。

沈大千(1973—), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统、技术监督电网等管理工作。

王昕(1972—), 男, 博士, 副教授, 从事电力设备检测研究工作。

Email: wangxin26@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-09-29; 修回日期: 2016-10-28
(杜景飞 编发)