基于改进鸡群算法的非侵入式负荷监测

刘兴杰[1],曹美晗[2],许月娟[3]
(1. 华北电力大学 电力工程系,河北 保定 071003;2. 国网河北省电力公司衡水供电分公司,河北 衡水 053000;
3. 国网安徽省电力公司蚌埠供电公司,安徽 蚌埠 233000)

摘要:监测负荷运行状态有利于加强电网负荷侧管理,引导用户合理消费,实现节能降耗。针对小功率负荷与大功率负荷同时投入时,单一谐波电流特征易受线路电压、电流波动影响导致负荷辨识精度低的问题,提出一种基于改进鸡群算法的负荷监测方法,设计综合考虑稳态谐波电流和功率特征的正态分布度量函数,作为改进鸡群算法的适应度函数。实验结果表明,采用所提方法可有效提高负荷辨识准确率。

关键词:非侵入式负荷监测;改进鸡群算法;正态分布度量函数;谐波电流;有功功率
中图分类号:TM 761 **文献标识码:**A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.033

0 引言

电能在整个社会生产和生活的能源消费中占了很大的比重。为此,实现电力能源的节约是节能减排的一个重要环节。随着科学技术的不断发展和人们生活水平的提高,家用电器数量和种类越来越多,居民用电量占总用电量的比例也随之增大。研究表明,引入用电信息反馈后,居民负荷侧会有较大的节能潜力[1]。家用负荷辨识技术能够极大地帮助供电公司了解居民用户的负荷组成与用电习惯,及时对供电计划作出调整,同时更能帮助用户了解家庭用电信息,从用户侧实行合理用电,促进节能减排[2-3]。

非侵入式负荷监测 NILM(Non-Intrusive Load Monitoring)技术最先由 Hart 等人在 20 世纪 80 年代提出[4],该方法通过从用户总电表接口处获取总功率、电压、电流的变化信息,来辨识负荷种类、运行情况及相关参数。这种负荷识别方法不需要安装大量的监测设备,不中断设备供电,易于被用户接受,适用于智能电表。负荷识别算法是非侵入式负荷监测技术的核心部分,经研究者们的不断深入研究,负荷辨识技术渐渐分化成 2 类。第一类称为模式识别算法,提取单独运行时的负荷特征参数组成负荷特征库,将未知负荷的特征参数逐一与特征库中的特征参数进行匹配,如利用匹配度[5]、明可夫斯基距离[6]确定匹配度最高值对应的负荷种类来确定未知负荷,或通过差量特征提取特征值变化量,再通过模糊聚类确定负荷种类[7]等方法。这类方法通常选用负荷启停数据作为辨识特征参数,因为负荷的启停特征具有唯一性,选用这种方法辨识单一负荷时有很高的准确性,但暂态特征不具有叠加性,因此,该方法无法用于辨识多种负荷同时投切的复杂情形。第二类则是优化算法,选取具有线性叠加特性的负荷特征量,选定适应度函数,将负荷投切行为的辨识转化为利用优化算法求解家电负荷最优组合问题,常用传统数学优化算法有整数规划法[8]、微分进化法[9]等,及智能算法如神经网络法[10]、离散粒子群优化算法[11]、遗传算法[12]等,这类方法仅在一定范围内可有效识别出同时工作的多种负荷:传统数学算法在寻优过程中对初值要求较高,求解时间长,且在特征参数较多时容易产生维数灾难;现在的智能算法原理简单,容易实现,搜索能力也较强,可迅速发展,但其又具有容易出现早熟现象和陷入局部收敛等缺陷。因此,在智能算法的选择及改进中应注意提高全局寻优能力。文献[13]提出将负荷稳态基波与谐波电流作为负荷特征量,采用离散二进制鸡群算法 CSO(Chicken Swarm Optimization algorithm)对多种负荷投切行为进行辨识,可以准确辨识功率值相近的多种负荷,有效提高全局寻优能力。但该方法采用单一特征作为适应度函数,且负荷的谐波特征易受线路中电压、电流波动干扰,使得小功率和大功率负荷同时投入时辨识精度较低。而将功率这一特征单独作为适应度函数时,能够准确辨识出功率差值较大的负荷,但对功率相同的负荷或负荷组合辨识精度较低。

综上所述,基于居民负荷在稳态工作时电流及功率均具有叠加性,本文提出一种基于改进鸡群算法 ICSO(Improved Chicken Swarm Optimization algorithm)的负荷监测方法,设计了综合考虑稳态谐波电流和功率特征的正态分布度量函数,作为改进鸡群算法的适应度函数。如此,该算法中的 2 种特征将互相弥补因选用单一特征适应度函数引起的辨识误差,共同确定最优解,较好地保持了种群多样性,具有很好的全局寻优能力和收敛速度。从而可有效解决采用单一特征作为适应度函数进行负荷辨识时功率差值

收稿日期:2017-12-07;**修回日期:**2018-04-06
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2015502066);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015MS86)
Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2015502066) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015MS86)

较大的负荷同时投入辨识精度低的问题,为了解居民的用电行为和非侵入式负荷监测提供依据。

1 家用负荷特征提取

稳态特征参数是指负荷处于稳定运行状态时可提取的特征量,本文主要提取的特征参数是电流基波与谐波电流和有功功率。

家电设备工作在稳定状态时,其基波与谐波电流具有周期性和规律性,如式(1)所示。

$$i_s(t)=I_{s1}\cos(\omega t+\theta_{s1})+I_{s2}\cos(2\omega t+\theta_{s2})+\cdots+I_{sk}\cos(k\omega t+\theta_{sk})+\cdots \tag{1}$$

其中,$i_s(t)$为电流瞬时值;k表示谐波次数,当$k=1$时,为基波;I_{sk}为第k次谐波分量的幅值;θ_{sk}为工作电流中第k次谐波分量的初相角。

假设某一家庭的家用电器共n种独立工作状态,由于稳态电流具有叠加性,此时非侵入式监测系统采集到的电流近似等于这n种工作状态电流的线性叠加,如式(2)所示。

$$i_L(t)=x_1i_{s1}(t)+x_2i_{s2}(t)+\cdots+x_ji_{sj}(t)+\cdots+x_ni_{sn}(t) \tag{2}$$

其中,$i_L(t)$为相应稳定运行阶段的总电流;$i_{sj}(t)$为设备工作电流;$x_1,x_2,\cdots,x_j,\cdots,x_n\in\{0,1\}$,表示$n$种家电设备的工作状况,其值为0时表示该负荷未工作,其值为1时表示该负荷工作。

由于电网中偶次谐波含量较少,本文不再考虑,故式(2)用相量法可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{L,1}\angle\theta_{L,1} \\ I_{L,3}\angle\theta_{L,3} \\ \vdots \\ I_{L,h}\angle\theta_{L,h} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} I_{s1,1}\angle\theta_{s1,1} & I_{s2,1}\angle\theta_{s2,1} & \cdots & I_{sn,1}\angle\theta_{sn,1} \\ I_{s1,3}\angle\theta_{s1,3} & I_{s2,3}\angle\theta_{s2,3} & \cdots & I_{sn,3}\angle\theta_{sn,3} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ I_{s1,h}\angle\theta_{s1,h} & I_{s2,h}\angle\theta_{s2,h} & \cdots & I_{sn,h}\angle\theta_{sn,h} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中,h为奇数,表示谐波次数;x_1、x_2、$\cdots$、x_n为待求变量。等号左侧矩阵中的元素是未知负荷的特征量,等号右侧矩阵中的元素是负荷特征库中存放的负荷特征参数。

式(3)可简记为:

$$\boldsymbol{I}_L=\boldsymbol{I}_s\boldsymbol{X} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{I}_L$为采集器采集到的家庭总电流矩阵;$\boldsymbol{I}_S$为家电设备谐波电流参数矩阵;$\boldsymbol{X}$为各家电负荷的工作状态矩阵。

至此,负荷辨识问题可转换为优化算法中寻求最优解的问题,选取以稳态电流基波与谐波为特征量的适应度函数,如式(5)所示。

$$\min f_1=\|\boldsymbol{I}_L-\boldsymbol{I}_s\boldsymbol{X}\| \tag{5}$$

其中,f_1为谐波电流适应度函数。

本文对有功功率P的计算基于傅里叶级数分解的方法,根据有功功率等于瞬时功率在一个周期内的平均值的定义得到式(6)。

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T u_si_s\mathrm{d}t=\sum_{h=1}^{\infty}V_hI_h\cos\varphi_h \tag{6}$$

其中,T为周期值;u_s、i_s分别为设备工作电压及电流瞬时值;V_h、I_h分别为设备工作电压与电流的有效值;φ_h为第h次谐波电流滞后电压的相位。

此外,负荷有功功率亦有可叠加性,总功率即为系统内处于工作状态的负荷功率之和。据此可构建优化适应度函数对电力负荷功率消耗进行分解,如式(7)所示。

$$\min f_2=\|\boldsymbol{P}_L-\boldsymbol{P}_s\boldsymbol{X}\| \tag{7}$$

其中,f_2为有功功率适应度函数;$\boldsymbol{P}_L$为采集器采集到的家庭总功率矩阵;$\boldsymbol{P}_s$为家电设备有功功率参数矩阵。

本文将稳态谐波电流和有功功率2种特征进行融合作为优化算法的适应度函数,并嵌入改进鸡群算法中,寻优得到使联合适应度函数值最小的$\boldsymbol{X}$取值,使式(5)和(7)同时达到最优,即可实现非侵入式负荷辨识。

2 基于改进鸡群算法的负荷监测

2.1 改进鸡群算法

鸡群算法由上海海事大学研究者Meng Xianbing[14]等人提出,该算法的基本原理是:通过确定鸡群的最优觅食位置来近似解决组合优化问题,即鸡群最优位置表示最优解。按照每只鸡的适应度函数值大小对鸡群进行排序,以适应度函数值为标准将鸡群分为公鸡、母鸡(包含鸡妈妈)和小鸡,适应度函数值越小,觅食时越有优势。按照生活经验,每个鸡群中的公鸡距离觅食食物最近,有最强的觅食能力,因此适应度函数值越小。鸡群中的鸡会根据自己的经验及本群中最强公鸡的位置及时调整位置,经过一定次数的调整后重新按照适应度函数值排序划分团体及等级。本节中将任一家电负荷的工作状态均用0和1来表示,在鸡群位置更新后,采用Sigmoid[15]函数映射出鸡的位置是取0还是1,算法的流程图见图1。

公鸡具有最强的觅食能力,比其他觅食能力较差的鸡在寻找食物时更具有优势,简而言之,觅食能力较强的鸡比觅食能力较弱的鸡在觅食范围上更广,可以通过式(8)—(11)来表示公鸡的位置:

$$x_{i,j}^{t+1'}=x_{i,j}^{t'}[1+\mathrm{randn}(0,\sigma^2)] \tag{8}$$

$$x_{i,j}^{t+1}=\begin{cases}1 & \mathrm{randn}()<\mathrm{sig}(x_{i,j}^{t+1'}) \\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{9}$$

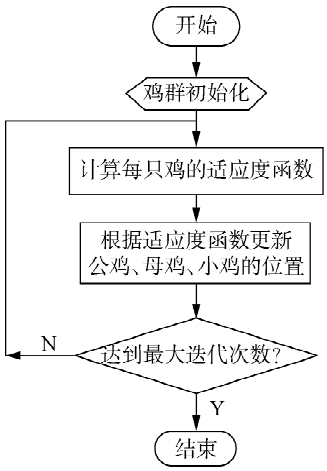

图 1　改进鸡群算法流程图

Fig.1　Flowchart of ICSO

$$\sigma^2=\begin{cases}1 & f_i<f_k \quad k\in[1,N],k\neq i\\ \exp\left(\dfrac{f_k-f_i}{|f_i|-\varepsilon}\right) & \text{其他}\end{cases} \tag{10}$$

$$\mathrm{sig}(x_{i,j}^{t+1'})=\frac{1}{1+\exp(-x_{i,j}^{t+1'})} \tag{11}$$

其中,sig( )表示 Sigmoid 函数映射;$x_{i,j}^{t+1'}$ 为 $t+1$ 时刻公鸡的位置;$x_{i,j}^{t+1}$ 为公鸡在 $t+1$ 时刻经过 Sigmoid 函数映射后的位置;randn$(0,\sigma^2)$表示服从 N$(0,\sigma^2)$的正态分布;k 表示随机从公鸡群中选出的公鸡的序号;N 为公鸡的总数;ε 为一个非常小的数;f_i 为 $x_{i,j}^t$ 对应的适应度函数值。

对于母鸡而言,它们跟随所在群体中的公鸡去觅食,但有时也会偷食其他群体中已经发现的食物,每个鸡群中有且只有一只公鸡,作为该群的头领,其表达式如(12)—(16)所示。

$$x_{i,j}^{t+1'}=x_{i,j}^{t'}+s_1\times\mathrm{rand}\times(x_{r_1,j}^t-x_{i,j}^t)+s_2\times\mathrm{rand}\times(x_{r_2,j}^t-x_{i,j}^t) \tag{12}$$

$$x_{i,j}^{t+1}=\begin{cases}1 & \mathrm{randn}()<\mathrm{sig}(x_{i,j}^{t+1'})\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{13}$$

$$s_1=\exp\left(\frac{f_i-f_{r_1}}{|f_i|+\varepsilon}\right) \tag{14}$$

$$s_2=\exp(f_{r_2}-f_i) \tag{15}$$

$$\mathrm{sig}(x_{i,j}^{t+1'})=\frac{1}{1+\exp(-x_{i,j}^{t+1'})} \tag{16}$$

其中,rand 为[0,1]之间的随机数;$r_1\in[1,N]$为公鸡的索引值;$r_2\in[1,G]$为鸡的索引值,G 为鸡群中鸡的数量,且 $r_1\neq r_2$。

小鸡的觅食能力是最差的,故只能在鸡妈妈的周边觅食,鸡妈妈是从母鸡中随机选取的,小鸡与鸡妈妈之间的母子关系也是随机建立的。小鸡的觅食过程可通过式(17)来描述。

$$x_{i,j}^{t+1}=x_{i,j}^t+F_{\mathrm{L}}(x_{h,j}^t-x_{i,j}^t) \tag{17}$$

其中,$x_{h,j}^t$ 为第 i 只小鸡的鸡妈妈位置,且 $h\in[1,M]$,M 为母鸡的总数;$F_{\mathrm{L}}\in(0,2)$表示小鸡将跟随自己的母亲去觅食。

每隔一段时间,重新按照适应度函数值的大小对鸡群划分等级,以增强鸡群的活性,然后按照上述方法继续寻找,直到找到全局最优解。

2.2　适应度函数

在改进鸡群算法中,适应度函数是度量群体中各个个体有可能达到或有助于找到最优解的优良程度。适应度函数通常由最优适应度函数值代替,但不同的适应度函数可能会解得不一样的优化结果。因此,一个优良的适应度函数是最终决定取得最优辨识结果的关键。

由于用电设备的电流谐波或者功率特征在一定程度上容易受到线路中电压、电流波动等干扰,特别是小功率和大功率设备一起投入时,单一特征所构建的适应度函数对最终辨识结果的准确性会产生一定影响。因此,为了获得准确的电力负荷辨识结果,本文将稳态电流特征和功率结合在一起,构建改进鸡群算法的适应度函数,搜寻最优解。基于此,本文先引入以正态分布形式的一个度量函数,其表达式如式(18)所示。

$$d_i(f_i)=\exp[-(f_i/\sigma_i)^2]\quad \sigma_i>0;i=1,2 \tag{18}$$

其中,参数 σ_i 为标准差,用来调整分布;d_i 值由 f_i 和 σ_i 共同决定。

将本文中 2 个特征量的适应度函数值以乘积的方式进行结合,得到改进鸡群算法的适应度函数如式(19)所示。

$$f_{\mathrm{itness}}=d_1d_2=\exp(-f_1^2/\sigma_1^2-f_2^2/\sigma_2^2) \tag{19}$$

其中,σ_1 和 σ_2 根据样本数据库进行人工设置,$\sigma_1=1$,$\sigma_2=50$。

由式(19)可以看出,适应度函数值是由 f_1 和 f_2 的值共同决定。特别地,当 f_1 达到最小而 f_2 有较大偏差,或者 f_2 达到最小而 f_1 有较大偏差时,式(19)会在一定程度上弥补因单个适应度函数值(功率或者谐波电流)造成的辨识错误,从而为提高负荷辨识结果的准确性奠定基础。

2.3　基于改进鸡群算法的非侵入式监测流程

基于改进鸡群算法的非侵入式负荷监测流程如图 2 所示。

3　算例分析

为验证本文方法的可行性与有效性,在实验室环境下搭建多家用电器的测试平台。对实验家庭主要的 12 种家电负荷(荧光灯、电视机、笔记本、电冰箱、电磁炉、热水器、电加热、空调、微波炉、洗衣机、

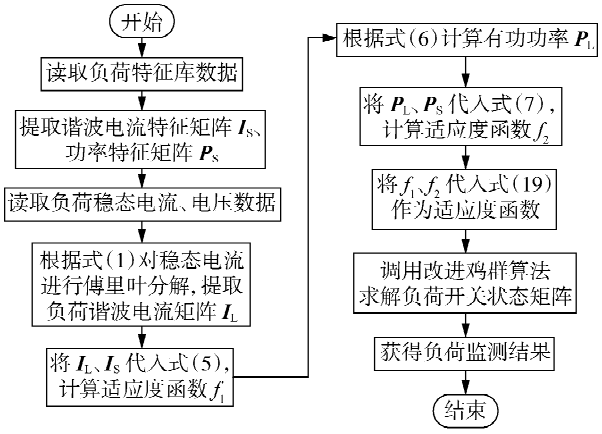

图2 基于改进鸡群算法的非侵入式负荷监测流程

Fig.2 Flowchart of non-intrusive load monitoring based on ICSO

饮水机、台式机)的14种运行状态稳态数据进行频谱分析,从中提取出电流奇次谐波分量及有功功率作为特征量,其有功功率如表1所示,电流及谐波幅值如表2所示。

表1 家电负荷有功功率

Table 1 Active power of household loads

序号	负荷名称	功率/W	序号	负荷名称	功率/W
1	荧光灯	10.07	8	空调制热	891.80
2	电视机	40.26	9	空调制冷	702.10
3	笔记本	22.45	10	微波炉	1 220.00
4	电冰箱	138.30	11	洗衣机洗	194.80
5	电磁炉	1 075.00	12	洗衣机甩	196.10
6	热水器	2 079.00	13	饮水机	536.40
7	电加热	1 013.00	14	台式机	80.79

表2 家用负荷正常工作下电流谐波幅值

Table 2 Harmonic current amplitude of household loads in normal operation

序号	负荷名称	基波幅值/A	3次谐波幅值/A	5次谐波幅值/A	7次谐波幅值/A
1	荧光灯	0.070	0.058	0.039	0.022
2	电视机	0.250	0.235	0.212	0.184
3	笔记本	0.165	0.074	0.012	0.008
4	电冰箱	1.234	0.056	0.043	0.015
5	电磁炉	6.782	0.242	0.103	0.090
6	热水器	12.81	0.080	0.121	0.060
7	电加热	6.329	0.003	0.068	0.029
8	空调制热	5.459	0.317	0.141	0.148
9	空调制冷	4.290	0.234	0.317	0.154
10	微波炉	7.609	2.970	1.066	0.273
11	洗衣机洗	1.163	0.096	0.083	0.023
12	洗衣机甩	1.151	0.082	0.025	0.020
13	饮水机	3.332	0.009	0.044	0.014
14	台式机	0.497	0.382	0.196	0.075

为验证本文所提算法的优越性,将本文算法与单一特征量构造的适应度函数及离散粒子群优化算法[25]进行对比实验,并将所改进的适应度函数应用到离散粒子群优化算法中以验证改进鸡群算法在非侵入式负荷辨识过程中的优越性。为了有效对比这4种算法的识别准确度,使迭代次数、种群规模和初始化种群完全相同,消除因参数及种群初始化不同带来的影响。其中迭代次数设定为300次,种群规模为50,每迭代5次更新一次等级次序。在采用改进鸡群算法进行寻优计算时,公鸡规模占比20%,母鸡占比60%,小鸡占比20%;离散粒子群优化算法中加速因子取经验值为1.49。

为了说明本文构建适应度函数应用于改进鸡群算法对负荷辨识的有效性,对5种不同负荷组成各进行20次仿真实验。在实验中,方法1为以谐波电流单独构造适应度函数的改进鸡群算法,方法2为以有功功率单独构造适应度函数的改进鸡群算法,方法3为以谐波电流为特征量的离散粒子群优化算法,方法4为以有功功率为特征量的离散粒子群优化算法,方法5为在离散粒子群优化算法中应用本文提出的适应度函数,方法6为本文所提算法,所得实验结果如表3所示。

表3 负荷辨识结果

Table 3 Result of NILM

投入负荷	准确辨识次数					
	方法1	方法2	方法3	方法4	方法5	方法6
荧光灯	18	17	19	20	19	20
电加热	20	16	19	19	20	20
微波炉+洗衣机	15	10	13	12	17	18
电冰箱+荧光灯	12	10	13	10	14	16
荧光灯+电磁炉+洗衣机	10	7	8	6	15	19
平均准确率/%	75	60	72	67	85	93

比较表3中的辨识结果及准确率可知,改进鸡群算法与离散粒子群优化算法在对单一负荷进行辨识时均有很高的精度,但面对复杂的负荷组合情况,离散粒子群优化算法更可能会陷入局部最优,从而停滞搜索,而在离散粒子群优化算法中应用本文所提联合适应度函数后辨识精度也有明显提高。但由结果看来,本文所提方法仍具有显著优势,这表明联合适应度函数对负荷辨识精度提高具有重要的正面影响,且将其应用于改进鸡群算法中效果更优。在改进鸡群算法中,公鸡具有最强的全局搜索能力,母鸡具有较强的局部搜索能力,而小鸡在更新等级秩序时,重新进行随机初始化,从而鸡群不停地进行寻优,提高了该算法的全局搜索能力。当离散粒子群优化算法寻得局部最优解,未能辨识出负荷工作状态时,改进鸡群算法在寻得此局部最优解后仍继续寻优搜索,最终求得全局最优解,准确地辨识出当前投入工作的负荷种类及状态。

此外,为了直观深入比较在改进鸡群算法中使用3种不同适应度函数对辨识精度的影响,设置了3组实验,分别选取3种负荷(荧光灯、电磁炉、洗衣

机,记为实验 1)、4 种负荷(笔记本电脑、热水器、空调制冷、洗衣机,记为实验 2)、5 种负荷(荧光灯、电视机、电冰箱、空调制冷、微波炉,记为实验 3)同时工作,其余设备均为工作时,用稳态谐波特征(方法 a)、功率特征(方法 b)和谐波与功率特征融合(方法 c)作为适应度函数进行负荷辨识。实验设置如表 4 所示,其中,x_1、x_2、…、x_{14}依次表示序号为 1—14 的不同的负荷状态,$x_i=0$ 表示该负荷停用,$x_i=1$ 表示该负荷运行。测试结果如表 5 所示。

由表 5 可以得出,采用方法 a 进行负荷辨识时,面对功率差值较大的负荷同时投入运行的情况,难以准确辨识出小功率负荷。如在实验 1 中采用方法 a 进行辨识得出的负荷状态为 0010 1000 0010 00,即判定投入运行的负荷分别为笔记本、电磁炉及洗衣机,与实验设置选择投入运行的负荷种类不符。该方法虽准确辨识出电磁炉与洗衣机的状态,但却未能准确辨识出荧光灯。由于方法 a 中采用谐波电流构造适应度函数,荧光灯与笔记本的消耗功率值较小,在同一个电压水平下进行傅里叶分解得到的谐波电流往往也会比较小,易使算法陷入局部最优,在功率差值较大的负荷同时投入时难以辨识出小功率负荷,从而影响辨识精度。

表 4　电力负荷辨识实验设置

Table 4　Settings of NILM experiment

实验	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	功率/W
1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1 297.87
2	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2 999.65
3	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2 110.73

表 5　基于改进鸡群算法的负荷辨识结果

Table 5　Results of NILM based on ICSO

实验	方法	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
1	a	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	b	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	c	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	a	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
	b	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
	c	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	a	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1
	b	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	c	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

采用方法 b 时,无法准确辨识功率值相似或者若干功率值之和相似的情形,例如实验 2 中,实验设置负荷总功率为 2 999.65 W,方法 b 辨识出负荷总功率之和为 3 004.46 W,而且实验 2 设置投入负荷包含洗衣机,而方法 b 辨识结果中未成功辨识出该负荷,表明该方法对具有相似功率值的负荷辨识精度较低。而采用方法 c 时,因功率差异值较小的负荷其各次谐波幅值却不尽相同,辨识精度也有了明显的改善。

而采用方法 c 进行负荷辨识时,基本能够得到准确的辨识结果,即克服了将谐波电流作为单一特征量进行辨识时,小功率负荷难以准确辨识的问题。

显然,由于谐波特征包含信息更为丰富,将谐波特征用于改进鸡群算法进行负荷辨识时精度优于功率特征。但就总体辨识结果而言,本文提出的方法综合考虑了谐波电流与功率 2 种特征量,辨识精度更优,基本与负荷实际开启状态一致,更适合用于非侵入式负荷监测。

4　结论

为了提高多负荷辨识精度,本文对离散二进制鸡群算法进行改进,以谐波电流和有功功率作为特征量,引入正态分布度量函数融合 2 种特征参数的最优化适应度函数值作为联合适应度函数。结果表明,应用本文所提算法进行负荷监测使负荷辨识精度由离散二进制鸡群算法的 75%提高到 93%,且这一精度也远远高于离散粒子群优化算法。可见本文算法能够有效提高非侵入式电力负荷辨识精度,同时应用该算法不仅能准确辨识功率值相近的多种负荷,还能有效辨识功率差值较大的负荷组合,提高了智能算法的全局寻优能力,为负荷监测提供了强大的技术支撑。在下一步的研究中将会着力解决稳态谐波电流因幅值较大,使该特征占比较大带来的辨识错误问题,提出具有更广泛适用性的负荷状态监测方法。

参考文献:

[1] 朱泽磊,周京阳,潘毅,等. 考虑电力电量平衡的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):168-176.
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, PAN Yi, et al. Security constrained economic dispatch considering balance of electric power and energy [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(10):168-176.

[2] 梁甜甜,高赐威,王蓓蓓. 智能电网下电力需求侧管理应用[J].

电力自动化设备,2012,32(5):81-85.
LIANG Tiantian,GAO Ciwei,WANG Beibei. Applications of demand side management in smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):81-85.

[3] 王蓓蓓,李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):19-24.
WANG Beibei,LI Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):19-24.

[4] HART G W. Prototype non-intrusive appliance load monitor[J]. Proceedings of the IEEE,1992,80(12):1870-1891.

[5] 高云,杨洪耕. 基于暂态特征贴近度匹配的家用负荷识别[J]. 电力系统自动化,2013,37(9):54-59.
GAO Yun,YANG Honggeng. Household load identification based on closeness matching of transient characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(9):54-59.

[6] LIANG J,NG S K K,KENDALL G,et al. Load signature study-part I:basic concept,structure,and methodlogy[J]. IEEE Transactions on Power Deliery,2010,25(2):551-560.

[7] BASU K,DEBUSSCHERE V,BACHA S,et al. Nonintrusive load monitoring:a temporal multilabel classification approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2015,11(1):262-270.

[8] 崔灿. 面向智能用电的非侵入式居民负荷监测关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
CUI Can. Study on key technologies in non-intrusive residential load monitoring for intelligent power utilization[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.

[9] 彭春华,刘刚,孙惠娟. 基于小波分解和微分进化支持向量机的风电场风速预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):9-13.
PENG Chunhua,LIU Gang,SUN Huijuan. Wind speed forecasting based on wavelet decomposition and differential evolution-support vector machine for wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):9-13.

[10] CHANG H H,CHEN K L,TSAI Y P,et al. A new measurement method for power signatures of non-intrusive demand monitoring and load identification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(2):764-771.

[11] 李佳,刘天琪,李兴源,等. 改进粒子群-禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):71-77.
LI Jia,LIU Tianqi,LI Xingyuan,et al. Application of improved particle swarm-tabu search algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):71-77.

[12] BARANSKI M,VOSS J. Genetic algorithm for pattern detection in NIALM systems[C]//2005 IEEE International Conference on Systems,Man and Cybernetics. The Hague,Netherlands:IEEE,2005:3462-3468.

[13] 许仪勋,李旺,李东东,等. 基于改进鸡群算法的非侵入式家电负荷分解[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(13):27-32.
XU Yixun,LI Wang,LI Dongdong,et al. Disaggregation for non-invasive domestic appliances based on the improved chicken swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control,2016,44(13):27-32.

[14] MENG X B,LIU Y,GAO X Z,et al. A new bio-inspired algorithm:chicken swarm optimization[C]//5th International Conference on Swarm Intelligence. Hefei,China:Springer International Publishing,2014:86-94.

[15] LEE K D. Electrical load information system based on non-intrusive power monitoring[D]. Cambridge,Massachusetts,USA:Massachusetts Institute of Technology,2003.

作者简介:

刘兴杰

刘兴杰(1979—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化和智能用电(**E-mail**:1005963@qq.com);

曹美晗(1993—),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化、智能用电(**E-mail**:787884002@qq.com);

许月娟(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化、智能用电(**E-mail**:1403673608@qq.com)。

Non-intrusive load monitoring based on improved chicken swarm optimization algorithm

LIU Xingjie[1],CAO Meihan[2],XU Yuejuan[3]

(1. Department of Electrical Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. State Grid Hebei Electric Power Company Hengshui Power Supply Branch,Hengshui 053000,China;
3. State Grid Anhui Bengbu Electric Power Company,Bengbu 233000,China)

Abstract:Monitoring load operation state is beneficial to strengthen the load side management of power grid,guide users to rationally use electricity,and realize energy saving and consumption reduction. Since the characteristics of single harmonic current is easily affected by the fluctuations of line voltage and current when the low power load and high power load are put into operation at the same time,causing low accuracy of load identification,a load monitoring method based on the improved chicken swarm optimization algorithm is proposed. The normal distribution metric function comprehensively considering the characteristics of steady-state harmonic current and active power is designed as the adaptation function of the improved chicken swarm optimization algorithm. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of load identification.

Key words:non-intrusive load monitoring;improved chicken swarm optimization algorithm;normal distribution metric function;harmonic current;active power