

DOI: 10.7667/PSPC151370

基于改进鸡群算法的非侵入式家电负荷分解

许仪勋¹, 李旺¹, 李东东¹, 游心超²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海和联通讯工程有限公司, 上海 201108)

摘要: 基于家电负荷在稳态工作时电流具有线性叠加的特点, 提出一种基于家电负荷稳态基波电流和谐波电流为负荷特征量的非侵入式家电负荷分解算法。通过将一家电负荷的任一工作状态用 0 和 1 来表示, 即只有关和开这两种状态, 则家电负荷分解问题可转化为求解优化组合问题, 然后运用改进鸡群算法来识别各个家电的工作状态。最后通过实例验证了该算法具有较高的负荷识别准确率和广泛的适用性, 有利于非侵入式家电负荷分解技术的推广与应用。

关键词: 非侵入式; 负荷分解; 改进鸡群算法; 基波电流; 谐波电流

Disaggregation for non-invasive domestic appliances based on the improved chicken swarm optimization algorithm

XU Yixun¹, LI Wang¹, LI Dongdong¹, YOU Xinchao²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai Helian Communication Engineering Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: Considering that the current of domestic appliances in steady work condition has the characteristics of linear superposition, the disaggregation algorithm for non-invasive domestic appliance loads is proposed. And this new algorithm features in taking the fundamental current and harmonic current of the steady domestic appliance loads as load characteristics. By marking any work condition of the domestic appliance load with “0” and “1”, which means only two states are available, close and open, the issue of domestic appliance loads aggregation can be turned into optimization and the work condition of each domestic appliance load will be identified via the improved chicken swarm optimization algorithm. Case study verifies this algorithm is of higher load accuracy and broader availability conducive to the popularization and application for the non-invasive domestic appliance loads identification technology.

Key words: non-invasive; load disaggregation; improved chicken swarm optimization algorithm; fundamental current; harmonic current

0 引言

在能源危机日益加剧、环境问题突出的今天, 全世界都在呼吁节能减排, 提高能源利用率。为此, 我国政府部门制定了《节能减排十二五规划》^[1], 大力支持与推动节能减排技术的创新与应用。与此同时, 电力行业也积极响应国家政策, 大力建设坚强智能电网^[2-3]以及推广新能源技术, 以此来缓解能源危机问题。随着科学技术的不断发展, 家电种类越来越多, 居民用电量占总用电量的比例也越来越

大。而非侵入家电负荷识别技术的提出, 将有助于家庭能源系统的研发与应用^[4], 有利于电力公司了解居民用户的负荷组成情况, 促进电力公司分时电价的实施, 有利于督促居民用户合理用电, 也有利于刺激家电生产商生产出更加节能的家电。

非侵入负荷识别技术始于上个世纪 80 年代, 由麻省理工学院 George Hart^[5]提出, 经过研究者们几十年来不断地深入研究, 非侵入式负荷识别技术日益成熟与完善。其中, 负荷识别算法是该技术的核心部分, 大致可分为两大类: 一类是模式识别算法, 即提取出未知负荷的特征参数, 然后逐一与负荷数据库中的负荷模型特征参数进行匹配, 如利用匹配度^[6]、相似度^[7]、明科夫斯基距离^[8]来进行家电负荷

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心 (13DZ225 1900)

识别, 其共同的优点在于负荷识别准确率高, 但它们的缺点是利用家电负荷的暂态特征作为负荷特征量, 而暂态负荷特征量不具备线性叠加性, 所以只适用于识别家电单独投切工作的情形, 而不适用于多个家电同时投切工作的情形, 限制了其适用范围; 第二类是优化算法, 根据文献[9-10]对负荷特征量的深入研究, 选取具有线性叠加性的负荷特征量, 利用优化算法求解家电负荷最优化组合问题, 如整数规划算法^[11]、微分进化算法^[12-15]、神经网络算法^[14-16], 这类方法的优点在突破了只适用于单一家电负荷识别的局限性, 可识别出多种家电负荷同时工作的复杂情形, 但降低了负荷识别准确率。

综合考虑上述两类方法的优点, 本文负荷识别采用的方法是以家电稳定工作时的电流基波和谐波作为负荷特征参数, 以改进鸡群算法作为负荷识别算法, 不仅适用于识别家电负荷单独工作的情况, 还适用于识别多种家电负荷同时工作的复杂情况, 且家电负荷识别准确率高。

1 家电负荷特征选取

当家电设备开始正常工作时, 其稳态基波电流与谐波电流具有周期性和规律性的特点, 其电流可表示为^[12]

$$i_s(t) = I_{s1} \cos(\omega t + \theta_{s1}) + \dots + I_{sk} \cos(k\omega t + \theta_{sk}) + \dots \quad (1)$$

式中: $i_s(t)$ 为一家电设备某一种稳定工作状态时的电流瞬时值; I_{s1} 是工作电流中基波分量的幅值; ω 为工作电流中的基波分量的角频率; θ_{s1} 为工作电流中的基波分量的初相角; k 为整数, 表示谐波次数, 当 $k=1$ 时, 表示基波; I_{sk} 为工作电流中的第 k 次谐波分量的幅值; θ_{sk} 为工作电流中的第 k 次谐波分量的初相角。

当某一家庭含有 m 类主要家电设备, 共 n 种独立工作状态, 忽略功率较小的工作状态以及家电设备, 根据稳态电流的线性叠加性可知, 非侵入式采集到的家庭总的电流近似等于这 n 种工作状态的线性叠加, 即

$$i_L(t) = x_1 i_{s1}(t) + x_2 i_{s2}(t) + \dots + x_n i_{sn}(t) \quad (2)$$

式中: $i_L(t)$ 为家庭的总电流; $i_{s1}(t), i_{s2}(t), \dots, i_{sn}(t)$ 分别为第 $1, 2, \dots, n$ 种状态的工作电流; $x_1, x_2, \dots, x_n \in \{0, 1\}$ 分别表示第 $1, 2, \dots, n$ 种家电设备状态的工作状况, 其值为 0 时表示该状态未工作, 其值为 1 时表示该状态工作。

用相量法来表示, 式(2)可表示为

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

式中: h 为奇数, 因为电网中偶次谐波含量很少, 所以主要考虑奇次谐波分量; $x_1, x_2, \dots, x_n \in (0, 1)$ 是方程组的待求变量; 等式左侧矩阵中的元素都是通过在线实测得到的已知量, 等式右侧矩阵中的元素是通过离线统计得到的已知量。

则式(3)可简记为

$$I_L = I_s X \quad (4)$$

式中: I_L 为采集器采集到的家庭总电流; I_s 为家电设备模型参数矩阵; X 为各家电负荷的工作状态矩阵。因此, 负荷识别问题转化为求最优组合问题的求解, 取目标函数为

$$f = \|I_L - I_s X\| \quad (5)$$

通过优化算法求得最优解, 使得目标函数值 f 取得最小值, 此时从 X 的对应元素值中即可获知各个家电负荷的工作状态, 从而可以统计各个家电负荷的能耗信息。

2 鸡群算法

2.1 标准鸡群算法

鸡群算法(Chicken Swarm Optimization Algorithm, CSO)于 2014 年由上海海事大学研究者 Xianbing Meng^[17]等人提出, 该算法的基本原理是: 假设把组合优化问题的潜在解看作是一只只鸡, 然后计算每只鸡的目标函数值, 并按照目标函数值的大小将鸡群划分公鸡、母鸡(包含鸡妈妈)和小鸡。其中, 公鸡的目标函数值最小, 距离目标食物最近, 并作为每个群体中觅食能力最强的鸡。每只鸡在各自的群体中觅食, 在寻找食物的过程中, 根据自己的经验以及所属群体中公鸡的经验来调整位置。在迭代过程中, 每隔一定次数后重新按其目标函数值排序划分其等级以及团体。

因为公鸡具有最强的觅食能力, 所以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, 具有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, 可通过以下表达式来表示。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t \times (1 + \text{randn}(0, \sigma^2)) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} 1, & \text{if } f_i \leq f_k \\ \exp\left(\frac{f_k - f_i}{|f_i| + \varepsilon}\right), & \text{else } k \in [1, N], k \neq i \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_{i,j}^t$ 表示 t 时刻公鸡的位置; $randn(0, \sigma^2)$ 表示均值为 0, 标准差为 σ^2 的高斯分布; ε 是一个非常小的常数, 防止式中出现分母为 0 的情况; k 表示公鸡的序号, 是随机从公鸡群中选出的; N 表示公鸡的总数; f_i 表示 $x_{i,j}^t$ 对应的目标函数值。

对于母鸡来说, 它们跟随团体中的公鸡去觅食, 但也会偷食其他群体已经发现的食物, 其表达式如下所示。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + s_1 \times rand \times (x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + s_2 \times rand \times (x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (8)$$

$$s_1 = \exp\left(\frac{f_i - f_{r_1}}{|f_i| + \varepsilon}\right) \quad (9)$$

$$s_2 = \exp(f_{r_2} - f_i) \quad (10)$$

式中: $rand$ 表示取 $[0, 1]$ 之间的随机数; $r_1 = [1, N]$ 是公鸡的索引值, 表示第 i 个母鸡团体中的头; 而 $r_2 = [1, N]$ 为公鸡的索引值, 这是从公鸡群中随机选取的, 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以式(11)来描述。

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{h,j}^t + FL \times (x_{h,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (11)$$

式中: $x_{h,j}^t$ 表示第 i 只小鸡的鸡妈妈的位置, 且 $h \in [1, M]$, M 为母鸡的总数; FL 为一个参数, $FL \in (0, 2)$ 表示小鸡将跟随自己的母亲去觅食, 考虑到个体的差异性, 每只小鸡的 FL 值将从 0 到 2 之间来随机选取。

每隔一段时间, 按照每只鸡的目标函数值的大小进行重新划分等级, 然后再按照上述公式进行寻找全局最优解。

2.2 改进鸡群算法

任一家电负荷工作状态只有开和关两种状态, 即用 0 和 1 来表示, 所以需要鸡群算法进行离散化, 将鸡群算法改进为离散二进制鸡群算法。即在鸡群位置更新后, 采用 sigmoid^[18-19] 函数, 最终通过映射的方法确定鸡的位置取 0 还是 1。改进后的离散二进制鸡群算法的表达式如下所示。

改进后的公鸡表达式为

$$x_{i,j}^{t+1'} = x_{i,j}^t \times (1 + randn(0, \sigma^2)) \quad (12)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } rand() < sig(x_{i,j}^{t+1'}) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

$$sig(x_{i,j}^{t+1'}) = \frac{1}{1 + \exp(-x_{i,j}^{t+1'})} \quad (14)$$

式中: $x_{i,j}^{t+1'}$ 表示鸡在 $t+1$ 时刻的位置; $x_{i,j}^{t+1}$ 表示鸡在 $t+1$ 时刻经过 sigmoid 函数映射后的位置。

改进后的母鸡表达式为

$$x_{i,j}^{t+1'} = x_{i,j}^t + s_1 \times rand \times (x_{r_1,j}^t - x_{i,j}^t) + s_2 \times rand \times (x_{r_2,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (15)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } rand() < sig(x_{i,j}^{t+1'}) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

$$sig(x_{i,j}^{t+1'}) = \frac{1}{1 + \exp(-x_{i,j}^{t+1'})} \quad (17)$$

由于小鸡的觅食能力最弱, 为了遵循自然界物竞天择的规律, 增强鸡群寻找全局最优解的能力, 防止鸡群算法陷入局部最优, 所以, 在每次更新等级秩序时, 对小鸡进行重新初始化, 以此来增强鸡群的活性, 提高鸡群的全局搜索能力。

3 实例验证

为了验证本文方法的可行性与有效性, 本文采用麻省理工学院的 REDDthe Reference Energy Disaggregation Data Set 数据进行家电负荷识别分析。然而, 由于美国家庭用户的接线方式与国内不同, 其每个家庭用户均由两根火线和一根零线组成, 两根火线电压的有效值为 120 V, 相位相差 180°。因此, 本文对家庭 3 中火线 1 上的主要家电负荷进行频谱分析, 从中提取出基波分量和谐波分量, 具体的家电负荷特征参数值如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 家庭 3 中火线 1 上有 7 种主要家电负荷, 共有 9 种不同工作状态。为了验证改进鸡群算法具有较高的负荷识别准确率, 与离散粒子群算法^[20]进行对比分析。为了有效对比两种优化算法的识别准确率, 使迭代次数、种群规模以及初始化种群完全相同, 消除了因参数及种群初始化不同带来的影响。其中, 迭代次数为 100 次, 种群规模为 30; 离散粒子群算法中加速因子取经验值为 1.49; 改进鸡群算法中, 令公鸡规模占总体 20%, 母鸡规模占总体 60%, 小鸡规模占总体 20%, 每迭代 5 次更新一次等级秩序。图 1 和图 2 分别为洗衣机单独工作、洗衣机与烘干机同时工作时, 改进鸡群算法与离散粒子群算法负荷识别仿真结果图。

表 1 家电负荷模型特征参数

Table 1 Domestic appliance load model characteristic parameters

家电名称	基波幅值	基波相位	三次谐波幅值	三次谐波相位	五次谐波幅值	五次谐波相位	七次谐波幅值	七次谐波相位
洗衣机	5.905 8	0.553 6	0.291 8	2.520 0	0.126 4	1.182 2	0.027 1	0.615 8
烘干机	26.441 4	1.579 0	0.451 0	0.158 8	0.249 4	2.806 7	0.050 7	1.876 5
微波炉	20.182 9	1.407 8	7.178 7	2.461 8	2.786 1	0.438 3	0.906 0	1.356 5
家电一	12.733 6	1.566 1	0.128 2	0.028 6	0.187 8	2.176 2	0.072 2	2.534 9
家电二状态一	15.747 9	1.573 2	1.223 7	1.398 6	0.467 8	2.039 8	0.097 5	2.623 3
家电二状态二	11.731 1	1.590 8	1.255 9	1.652 6	0.218 8	0.816 4	0.235 7	1.375 2
家电二状态三	19.568 3	1.573 0	0.268 4	0.307 3	0.321 7	2.342 5	0.138 8	0.206 6
家电四	4.325 8	1.580	0.059 4	0.120 7	0.037 6	2.441 3	0.019 5	1.552 5
家电五	14.500 6	1.571 4	0.170 8	0.065 4	0.173 4	2.313 8	0.073 6	2.952 3

注：表中幅值单位为 A，相位单位为 rad；REDD 数据中家庭 3 中家电的有些家电名称标注不明确或未进行标注，所以文中用家电一到家电五依次各代表一种家电负荷，其中，家电二状态一、二、三分别表示家电二的三种不同工作状态。

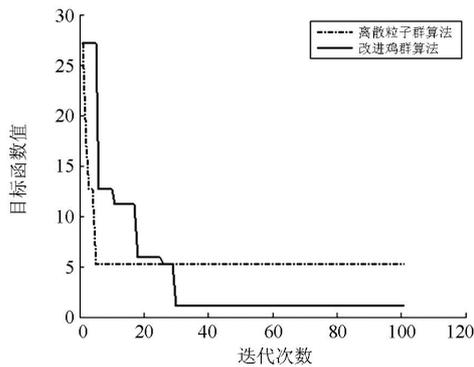


图 1 洗衣机单独工作

Fig. 1 Washing machine working alone

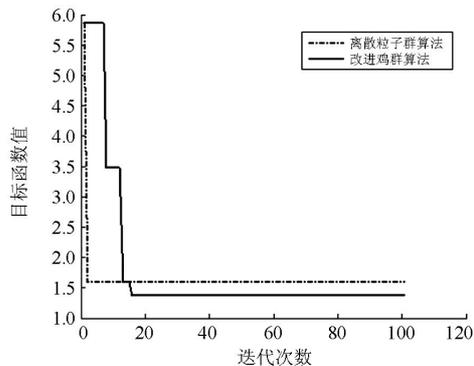


图 2 洗衣机与烘干机同时工作

Fig. 2 Washer and dryer working simultaneously

由图 1、图 2 可以看出，离散粒子群算法可能陷入局部最优解，从而停滞搜索，得不到全局最优解。而在改进鸡群算法中，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，从而使得鸡群不停地进行搜索，提高了该算法的全局搜索能力。当离散粒子群算法寻得局部最优解，未能正确

识别出家电负荷工作状态时；而改进鸡群算法在寻得此局部最优解后仍继续进行寻优搜索，最终求得全局最优解，准确地识别出当前家电工作的种类及其状态。

为了进一步深入对比两种算法的识别准确率，现对不同家电负荷分别进行实验，对多种家电工作状态试验各设置运行 20 次，并统计分析了两种算法识别出的次数和准确率，详细数据如表 2 所示。

表 2 负荷识别准确率

Table 2 Load recognition accuracy

工作家电	实验次数	离散粒子群算法		改进离散鸡群算法	
		识别出的次数	准确率 (%)	识别出的次数	准确率 (%)
家电一	20	10	50	20	100
家电二状态三	20	13	65	19	95
家电五	20	8	40	18	90
洗衣机	20	10	50	20	100
洗衣机、烘干机	20	7	35	19	95
微波炉、家电五	20	6	30	18	90
平均准确率			45		95

从表 2 中的数据可以看出，当离散粒子群算法与改进鸡群算法具有相同的种群规模、迭代次数、以及种群初始化时，离散粒子群算法在识别单一家电工作时，其准确率较高，而当有多个家电同时工作时，其识别准确率较低；而改进鸡群算法无论是在单一家电工作还是由多种家电同时工作时，都能较为准确地识别出家电负荷状态，具有较高的家电负荷识别准确率，且参数易于设定，因此，改进鸡群算法具有广泛的适用性。

4 结语

本文充分利用了各类家电负荷的稳态电流的本

质特征, 提出以改进鸡群算法为负荷识别算法, 将通过采样得到的稳态工作电流与数据库中家电状态负荷模型进行优化组合。通过实际算例证明, 改进鸡群算法比离散粒子群算法的负荷识别准确率更高, 可准确识别出家庭中主要家电负荷各种复杂工作的情况, 更适用于非侵入式家电负荷识别, 且其参数易于设定, 方法简单可行, 有利于非侵入式家电负荷识别技术的推广与应用。

参考文献

- [1] 国务院. 节能减排十二五规划[EB/OL]. <http://news.bjx.com.cn/html/20120822/382157-5.shtml>. State Council Energy Conservation Five-Year Plan[EB/OL]. <http://news.bjx.com.cn/html/20120822/382157-5.shtml>.
- [2] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xingyuan, WEI Wei, WANG Yuhong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [3] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 148-153.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, GUO Kunya, et al. Study on the supporting role of smart grid to the construction of smart city[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 148-153.
- [4] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 144-154.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuanzhi. Review of home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 144-154.
- [5] HART G W. Nonintrusive appliance load monitoring[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [6] 高云, 杨洪耕. 基于暂态特征贴切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.
- [7] 李静, 杨洪耕. 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.
LI Jing, YANG Honggeng. A load identification method for household smart meter[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 83-89.
- [8] 高云, 杨洪耕. 基于明可夫斯基距离的家用负荷分类计量[J]. 电测与仪表, 2013, 50(5): 86-90.
GAO Yun, YANG Honggeng. Household load measurement by classification based on Minkowski distance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(5): 86-90.
- [9] LIANG J, NG S K K, 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.
- [10] 郑小霞, 刘庆强, 林顺富, 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, LIN Shunfu, et al. Research of the microscopic signatures of residential loads for NILM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 62-70.
- [11] 张晓, 张健文. 基于整数规划的非侵入式电力负荷在线分解[J/OL]. [2012]. <http://www.paper.edu.cn>.
ZHANG Xiao, ZHANG Jianwen. Nonintrusive method for on-line power load decomposition based on integer programming[J/OL]. [2012]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [12] 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 decomposition[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(4): 303-308.
- [13] 侯贸军, 罗春辉, 隗霖捷, 等. 基于微分进化算法的水火电短期优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 54-61.
HOU Maojun, LUO Chunhui, WEI Linjie, et al. Study on short-term hydrothermal scheduling based on differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 54-61.
- [14] 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.
- [15] CHANG H H, LIN C L. A new method for load identification of nonintrusive energy management system in smart home[C] // e-Business Engineering (ICEBE), 2010 IEEE 7th International Conference on. IEEE, 2010: 351-357.

- [16] 李龙, 魏靖, 黎灿兵, 等. 基于人工神经网络的负荷模型预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 225-230.
LI Long, WEI Jing, LI Canbing, et al. Prediction of load model based on artificial neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 225-230.
- [17] MENG X, LIU Y, GAO X, et al. A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization[M] // Advances in swarm intelligence. Springer International Publishing, 2014: 86-94.
- [18] 姚玉海, 王增平, 郭昆亚, 等. 基于 E 占优的多目标二进制粒子群算法求解配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 76-81.
YAO Yuhai, WANG Zengping, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration using a multi-objective binary particle swarm optimization based on E-dominance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 76-81.
- [19] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.
ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [20] 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, 30(增刊 1): 358-364.
QU Zhaoyang, YU Huatao, GUO Xiaoli. The recognition of appliances instantaneous load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 358-364.

收稿日期: 2015-08-05; 修回日期: 2016-03-03

作者简介:

许仪勋(1969-), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电能质量及智能用电; E-mail: xu_yixun@sina.com

李旺(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能用电; E-mail: 914384645@qq.com

李东东(1976-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事风力发电与电力系统稳定控制、智能用电等方面的研究工作。

(编辑 周金梅)