

DOI: 10.7667/PSPC170597

# 基于萤火虫优化算法的分布式发电设备容量分配及配电网孤岛划分

胡博<sup>1</sup>, 王昕<sup>1</sup>, 郑益慧<sup>1</sup>, 金洋<sup>2</sup>, 张昕<sup>2</sup>, 杨颖<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电工与电子技术中心, 上海 200240; 2. 国网吉林省电力有限公司延边供电公司, 吉林 延边 133000)

**摘要:** 随着分布式发电设备大量接入到配电网中, 分布式发电设备在配电网故障情况下为接入位置负荷及周边重要负荷的供电研究日益引起关注。利用投入产出法确定负荷的失负荷价值, 基于失负荷价值设定负荷权重。在接入位置和总容量确定的情况下, 以总权值最大为目标, 利用萤火虫优化算法讨论接入容量的最优分配以及故障条件下的孤岛运行范围。将该方法应用于含分布式电源的智能配电网中, 通过对比验证了方法的有效性。

**关键词:** 分布式电源; 孤岛划分; 萤火虫优化算法; 配电网; 失负荷价值

## Calculation of isolated island partition and distributed generator capacity based on firefly algorithm

HU Bo<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, ZHENG Yihui<sup>1</sup>, JIN Yang<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, YANG Ying<sup>2</sup>

(1. Center of Electrical & Electronic Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Yanbian Power Supply Company, Jilin Electric Power Co., Ltd., State Grid Corporation of China, Yanbian 133000, China)

**Abstract:** With more and more distributed generator devices connected to distribution networks, the research on how to ensure distributed power generation equipment to supply power for the connected load and important load around when distribution network fault has drawn much attention. The load weight is set by calculating the value of lost load which is determined by input and output. In the condition that connecting spots and whole capacity of DG are settled, and taking maximal weighting as objective function, firefly algorithm is used to calculate the optimal distribution of accessed capacity and isolated island partition under fault. In the end of this paper, the firefly algorithm is applied to a smart distribution network with distribution generators. The results validate the feasibility of the proposed method through comparison.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673268), Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 61533012), Shanghai Municipal Natural Science Foundation (No. 14ZR1421800), and State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries.

**Key words:** distributed generator (DG); isolated island partition; firefly algorithm; distribution network; value of lost load (VOLL)

## 0 引言

近年来, 由于全球能源需求的增长和化石燃料对能源的破坏, 新能源发电技术得到了充分的发展, 越来越多的新能源发电设备接入系统当中。这些新

能源发电设备通常是以小规模分布式电源(Distributed Generator, DG)的形式接入配网用户附近。除了满足日常的能源需求, DG 还能在外部电网发生故障时保障配电网重要负荷的供电, IEEE Std.1547-2011<sup>[1]</sup>也由原来 IEEE Std.2000.929 中避免电网的孤岛运行修改为支持电网和用户通过技术手段实现计划孤岛运行。

计划孤岛(Intentional Islanding)指的是在上级发生故障无法为下级配网供电时, 根据配电网结构<sup>[2]</sup>、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61673268); 国家自然科学基金重点项目资助(61533012); 上海市自然科学基金项目资助(14ZR1421800); 流程工业综合自动化国家重点实验室开放课题基金资助

DG 接入位置<sup>[3]</sup>和接入容量<sup>[4]</sup>、线路参数等信息<sup>[5-6]</sup>，将配电网解列为几个可以独立安全稳定运行的子网。

目前，国内外学者已经针对 DG 接入后的配电网孤岛运行范围问题做了大量研究工作，划分孤岛范围的研究主要是在考虑发电容量<sup>[7]</sup>、线路传输容量<sup>[8]</sup>、网络连通性<sup>[9]</sup>等约束条件下，以提高供电范围<sup>[10]</sup>、减小供电网损<sup>[11-12]</sup>、保障对重要负荷供电<sup>[13]</sup>等条件中的一个或几个为优化目标，通过 Kruskal 算法<sup>[14]</sup>、遗传算法<sup>[15]</sup>等优化算法计算出最优的孤岛运行范围。如文献[16]提出利用动态规划算法，计算在满足功率平衡的条件下尽可能恢复供电，但是仅仅考虑孤岛运行的稳定性并没有针对负荷重要性等特点，有选择性地划分孤岛范围；文献[17]提出按照负荷等级和功率因数等因素，对负荷设置不同的权重和系数，以权重总和最大为优化目标，利用混合法计算孤岛范围，然而这种负荷权重的设置方法并不合理，配网中负荷重要性与负荷特性相关性大，仅通过负荷等级设置权重并不能反映真实情况；文献[18]提出了基于生产价值数据的失负荷价值，基于此设置单位功率权重并基于图论计算孤岛范围，但是文献[18]并未就居民负荷权重进行讨论，未计及功率的可控性，同时基于图论的孤岛划分方法可能陷入局部最优解，无法保障线路末端的重要负荷的供电。

因此本文提出了负荷部分可控负荷权重，弥补了计算孤岛运行范围时针对负荷特点和变化讨论不足的缺点，同时本文考虑到通常配网当中 DG 接入点固定而接入容量可变的情况，提出配电网 DG 总接入量固定，以各接入点 DG 负荷为变量，利用萤火虫算法计算 DG 分配方案及对应孤岛运行范围的方法，在文末将该计算方法应用于吉林省延边地区配电网中，验证了该方法的有效性。

## 1 负荷权重的确定

### 1.1 生产负荷权重

电力失负荷价值(Value of Lost Load, VOLL)是指由于负荷停电对国民经济造成的经济损失，反映负荷具有的经济价值。本文采用文献[19]提出的投入产出法计算生产负荷的权重。投入产出法是通过经济系统中各部门之间的投入与产出联系衡量各部门单位用电所产生的价值( $V_j$ )，由直接电力价值( $V_{dj}$ )和间接电力价值( $V_{ij}$ )两部分组成，其计算公式为

$$V_j = V_{dj} + V_{ij} \quad (1)$$

$$V_{dj} = N_j / G_{kj} \quad (2)$$

$$V_{ij} = \frac{L_j \sum_{i=1}^n X_{ij}}{G_k X_j} \quad (3)$$

式中： $N_j$ 为  $j$  部门产出的增加值； $G_{kj}$ 为  $j$  部门消耗电量；式(3)为间接电力价值，是电力部门单位电量间接产生的  $j$  部门价值； $X_{ij}$ 为中间消耗，是  $i$  部门生产需要的  $j$  部门的产品数量价值； $G_k$ 代表电力部门的总发电量； $X_j$ 为  $j$  部门的总产出量。

以此确定各生产部门的电力负荷价值，由式(1)一式(3)得到各部门电力价值如表 1 所示。

表 1 生产负荷电力价值和负荷权重

Table 1 Electricity value of sectors and load weights

部门	电力价值/ (元/kWh)	配电网负荷 权重/MW
农业	21.425	13.064
采掘业	5.374	3.277
食品制造业	11.025	6.723
纺织业	7.037	4.289
电力热力及水的 生产和供应业	1.64	1
石油加工业	3.069	1.871
化学工业	3.041	1.855
非金属矿物制品业	2.171	1.324
机械设备制造业	2.132	1.3
其他制造业	12.684	7.734
建筑业	7.753	4.727
运输、邮电业	40.175	24.497
贸易、住宿和餐饮业	24.371	14.86
其他服务业	40.797	24.876

按照该表，将电力、热力及水的生产供应业每兆瓦的负荷权重设置为 1，其他部门权重按其电力价值同比例设置。

### 1.2 居民负荷权重

居民负荷由于不产生实际价值，用该方法计算得到的负荷权重将无法客观体现其电力价值。由于生活负荷所涉及到广泛的社会效益，而居民负荷断电所造成的社会影响和损失也是多方面的，目前缺乏相关统计，因此，对于普通居民负荷本文设置为与其相近的其他服务业的权重，考虑居民负荷中含有维持城市正常运转的重要部分比如交通信号、公共照明、供水供气、行政、通信等关键负荷，因此，本文将按照其特点分别设置其负荷权重为普通负荷的 1~2.6 倍。

对于居民负荷不同于生产负荷的另一点是一

个负荷包含多种类型的负荷, 各负荷停电造成的损失不同, 因此其权重不同。以一个居民小区为例, 安保设施停电损失较大, 照明供电、供水增压等负荷的停电损失也都有区别, 因此本文将一个居民负荷拆分成几个不同权重的部分。

在部分智能电网发展较快的国家和地区已经可由供电企业远程控制部分负荷, 比如室内空调系统等, 因此本文为真实反映可控负荷的情况将其中的40%设置为重要负荷, 剩余60%设置为可控负荷, 其权重取原负荷权重的70%, 在计算时可等效为一个首端设置可控开关并联接入同一位置的负荷。

## 2 孤岛范围划分算法

### 2.1 负荷模型

本文的负荷模型考虑以下条件<sup>[20]</sup>。

负荷重要性, 按照投入产出法计算的电力价值对各类生产负荷赋权 $\omega_i$ 。

可控负荷, 对于负荷 $L_i$ 可以分为可控部分 $\alpha L_i$ 和不可控部分 $\beta L_i$  ( $\alpha + \beta = 1$ ,  $\alpha \geq 0$ ,  $\beta \geq 0$ ); 负荷重要性按照负荷特点分别设置, 不可控部分直接接入原位置, 可控部分以一个首端设置可控开关的形式并联在原位置。

计算孤岛范围需要满足一定的约束条件, 其中包括:

连通性约束, 有分布式发电设备接入的节点为根节点, 划入孤岛范围内的负荷必须与根节点保持连通才能供电, 因此, 根节点与孤岛范围内的任一负荷之间线路上的负荷也必须在孤岛范围内。

$$x_i = \{0, 1\}, x_i \geq x_{i+1} \quad (4)$$

式中:  $x_i$  代表该节点是否包含在孤岛范围内, 如果包含则取1, 不包含取0;  $x_{i+1}$  为 $x_i$ 的父节点。

功率平衡约束, 孤岛范围内需保证功率的平衡并保留一定的裕度。

$$P_{Gi} \geq \gamma \sum_{P_{Li} \in I} P_{Li} \quad (5)$$

式中:  $P_{Gi}$  为孤岛内分布式发电容量;  $\gamma$  为裕度系数;  $\sum_{P_{Li} \in I} P_{Li}$  为孤岛内负荷功率之和。

传输线路安全约束, 为了满足电网中线路和变压器的安全约束, 保证继电保护不动作, 需要孤岛范围内任意一条线路和变压器上流过的电流不超过线路的安全电流。

$$I_{li} \leq I_{li}^{\max} \quad (6)$$

式中:  $I_{li}$  为孤岛范围内线路或变压器上流过的电

流;  $I_{li}^{\max}$  为该线路或变压器上所允许流过的最大电流。

### 2.2 萤火虫优化算法

萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)是通过对萤火虫群体行为简化和模拟得到的一种高级启发式算法。萤火虫算法通过模拟萤火虫个体之间的相互吸引达到寻优的目的<sup>[21]</sup>, 是一种基于群体搜索的随机优化算法, 该算法首先设置一组解, 然后通过多次迭代更新解, 直至搜索得到最优解。

自然界中的萤火虫都会发出光吸引其他的萤火虫, 同时也会被其他萤火虫发出的光吸引。

假设待优化的解空间是 $d$ 维的, 算法首先在该解空间中初始化一群萤火虫的位置 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n$ , 对于某只萤火虫, 其初始光强度即为其发出光在距其距离为零处的强度记为 $I_i$ ,  $I_i$ 与 $\bar{x}_i$ 处的目标函数值相等, 即:  $I_i = f(\bar{x}_i)$ 。萤火虫 $i$ 发出的光在经过传输在萤火虫 $j$ 处的强度为 $I_{ij}$ , 其同 $r^2$ 成正比<sup>[22]</sup>, 满足式(7)。

$$I_{ij} = I_i e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  为光吸收系数, 可设置成一个常数;  $r_{ij}$  为萤火虫和萤火虫之间的笛卡尔距离, 即

$$r_{ij} = \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (8)$$

假设萤火虫 $i$ 对萤火虫 $j$ 的吸引力和萤火虫 $i$ 在萤火虫 $j$ 处的相对亮度成比例, 则由萤火虫 $i$ 的相对亮度的定义, 可以得到萤火虫对萤火虫 $j$ 的吸引力 $\beta_{ij}(r_{ij})$ 为

$$\beta_{ij}(r_{ij}) = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (9)$$

由于萤火虫 $i$ 的吸引, 萤火虫 $j$ 向其移动而更新自己的位置,  $j$ 的位置更新如式(10)。

$$\bar{x}_j(t+1) = \bar{x}_j(t) + \beta_{ij}(r_{ij})(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_j(t)) + \alpha \varepsilon_j \quad (10)$$

式中:  $t$  为迭代次数;  $\beta_{ij}(r_{ij})$  为萤火虫 $i$ 对萤火虫 $j$ 的吸引力由式(10)计算得到;  $\alpha$  为区间 $[0, 1]$ 上的常数;  $\varepsilon_j$  是由高斯分布、均匀分布或者其他分布得到的随机数向量。

在本文中,  $\bar{x}$  为由各接入点的分布式发电设备容量组成的向量, 依次迭代, 找到满足负荷权重综合的最优分配方案和其对应的孤岛运行范围。

### 2.3 孤岛范围和分布式发电容量方案的生成

首先设置初始的分配方案, 通过遍历式搜索算法找到该方案下所有的孤岛划分方案, 计算权值最

大的孤岛运行方案，然后通过萤火虫算法迭代计算寻找容量空间内最优的分布式发电设备分配方案及其对应的孤岛划分方案。

### 3 算例

本文算法基于电力失负荷价值确定负荷的权重，权重的确定与负荷特性相关性较强，故采用实际算例，该算例为接入东北某地变电站的配电网系统，该系统包含四条线路，总容量 40 MVA，接入容量设为总容量的 8 MVA，实际接入点为线路中段居民区附近。配电网负荷参数如图 1 和图 2 中数字所示，其中，斜线左侧数字为负荷大小，右侧数字为负荷权重。

方案一为按照优化算法对 DG 接入容量进行分配并计算孤岛运行范围，方案二为按照线路的负荷总量对 DG 接入容量进行分配并计算孤岛运行范围，方案三为按照线路的负荷权重总量对 DG 接入容量进行分配并计算孤岛运行范围。

线路孤岛划分如图 1 和图 2 中方框所示。

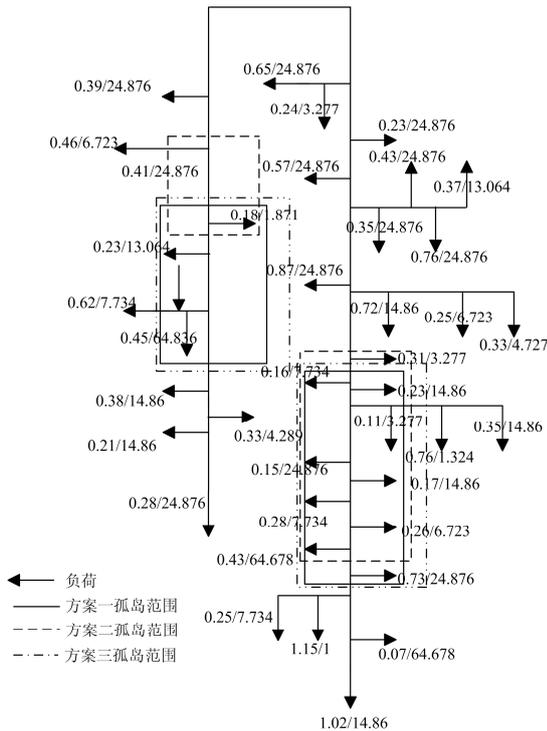


图 1 线路 1、2 孤岛划分

Fig. 1 Isolated island partition of line 1 and line 2

仿真运算结果如表 2 所示。

与方案二相比，方案一负荷权重总和提高了 78.81%，与方案二相比，方案一负荷权重总和提高了 31.05%，证明利用优化算法可以在系统无法供电的情况下为重要负荷提供更有力的保障。

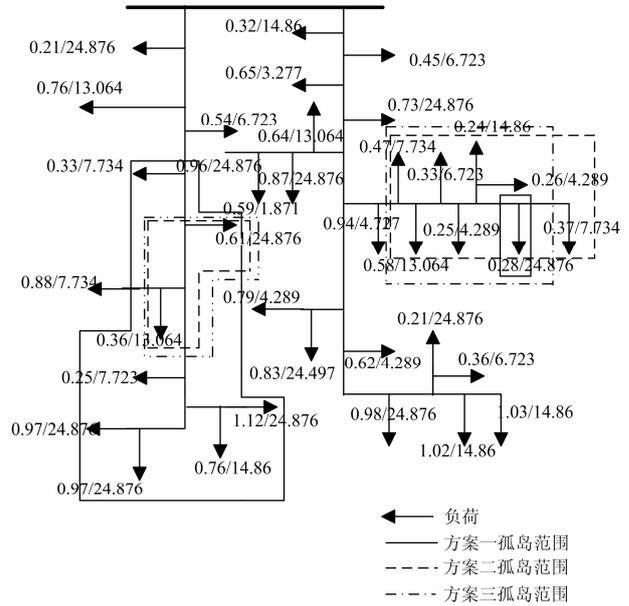


图 2 线路 3、4 孤岛划分

Fig. 2 Isolated island partition of line 3 and line 4

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	总和
方案一 分配容量	0.860 7	2.521 6	4.332 6	0.281 8	7.996 7
方案二 分配容量	0.793 2	2.447 9	1.562 2	3.196 8	8.000 1
方案三 分配容量	1.013 7	2.600 8	1.751 1	2.634 3	7.999 9
方案一 负荷权重和	32.446 6	53.530 8	90.718 2	9.890 7	186.586 3
方案二 负荷权重和	8.700 1	44.014 2	19.877 4	31.759 8	104.351 5
方案三 负荷权重和	32.446 6	61.157 8	19.877 4	28.898 2	142.380 0

### 4 结论

通过失负荷价值法确定的负荷权重可以客观反映负荷的价值，弥补了按照负荷等级划分太过粗略的缺点。

针对实际工程中，负荷接入点固定的条件，利用萤火虫优化算法可以快速得到在接入 DG 总容量一定时，对应解空间内以最大化负荷权重和为目标的接入容量最优化分配方案。

同按照线路容量或线路负荷总权重分配 DG 接入容量的方案相比，优化方案可以大幅提高孤岛范围内的负荷权重总和，但各线路接入容量的分配可能会比较集中。

## 参考文献

- [1] IEEE STD 1547.4-2011 IEEE guide for design, operation, and integration of distribution resource island system with electric power system: IEEE STD 1547.4—2011[S]. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [2] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [3] AWAD A S A, EL-FOULY T H M, SALAMA M M A. optimal ESS allocation and load shedding for improving distribution system reliability[J]. Electric Power Components & Systems, 2014, 42(6): 2339-2349.
- [4] 李滨, 祝靖, 李佩杰, 等. 含非可靠分布式电源的配电网孤岛划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 59-65.  
LI Bin, ZHU Jing, LI Peijie, et al. Island partition of distribution network with unreliable distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 59-65.
- [5] HILARY E B, SIDDHARTH S, SUDARSHAN A N, et al. Improving reliability of islanding distribution system with distributed renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2028-2038.
- [6] PAGANI G A, AIELLO M. Towards decentralization: a topological investigation of the medium and low voltage grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 538-547.
- [7] 胡哲晟, 郭瑞鹏, 蓝海波, 等. 基于有向图的含分布式电源配电网孤岛划分模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 97-104.  
HU Zhesheng, GUO Ruipeng, LAN Haibo, et al. Islanding model of distribution systems with distributed generators based on directed graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 97-104.
- [8] 黄炜, 刘健, 焜魏昊, 等. 分布式光伏电源极端可接入容量极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 22-27.  
HUANG Wei, LIU Jian, WEI Haokun, et al. Extreme capacity limitations of photovoltaic generators in distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 22-27.
- [9] LASSETER R H. Smart distribution: coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1074-1082.
- [10] 王旭东, 林济铿, 李胜文, 等. 电力孤岛划分研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 125-135.  
WANG Xudong, LIN Jikeng, LI Shengwen, et al. Review of research on island partitioning in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 125-135.
- [11] RAO R S, RAVINDRA K, SATISH K, et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the Presence of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 317-325.
- [12] JABR R A, SINGH R, PAL B C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-Integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [13] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [14] 刘宗歧, 鲍巧敏, 孙春山, 等. 基于改进 Kruskal 算法的含分布式发电的配电网孤岛划分算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 164-171.  
LIU Zongqi, BAO Qiaomin, SUN Chunshan, et al. Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved Kruskal algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 164-171.
- [15] 王晶, 陈骏宇, 金华锋. 含分布式电源的配电网动态孤岛划分博弈模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 14-24.  
WANG Jing, CHEN Junyu, JIN Huafeng. A game model of dynamic island partition for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 14-24.
- [16] 李振坤, 周伟杰, 钱啸, 等. 有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 67-75.  
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, QIAN Xiao, et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators[J]. Transactions of China

Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 67-75.

[17] 周源, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.

ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.

[18] 倪程捷, 房鑫炎, 赵文恺, 等. 基于图论的移动应急电源孤岛划分及最优接入点搜索[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 34-40.

NI Chengjie, FANG Xinyan, ZHANG Wenkai, et al. Island partitioning and optimal connecting point search of mobile emergency power source based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 34-40.

[19] 谭显东, 胡兆光. 基于投入产出法的电力失负荷价值研究拓展[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 51-55.

TAN Xiandong, HU Zhaoguang. Further study on value of lost load based on input-output method[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 51-55.

[20] 刘文学, 梁军, 贲志皓, 等. 考虑节能减排的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 62-70.

LIU Wenxue, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Multi-objective fuzzy chance constrained dynamic economic dispatch considering energy saving and emission reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 62-70.

[21] 王晶, 王宗礼, 陈骏宇, 等. 基于萤火虫优化算法的微电网—荷博弈模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 7-12.

WANG Jing, WANG Zongli, CHEN Junyu, et al. A game model for DGs-loads in microgrid based on firefly algorithm and its analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 7-12.

[22] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.

CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.

收稿日期: 2017-04-23; 修回日期: 2017-12-08

作者简介:

胡博(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网可靠性, 分布式发电设备运行与检测等; E-mail: hubodadi@sjtu.edu.cn

王昕(1972—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为可再生能源的分布式发电、功率预测和稳定接入技术等; E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn

郑益慧(1971—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电能质量, 智能控制技术在电力系统中的应用等方面的研究。E-mail: zhengyihui@sjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)