

DOI: 10.7667/PSPC171701

# 基于改进萤火虫算法的含 DG 配电网重构方法

许喆<sup>1</sup>, 潘金生<sup>2</sup>, 樊淑娴<sup>1</sup>, 宋筱爽<sup>3</sup>, 翟爽<sup>4</sup>, 公茂法<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 东营方大电力设计规划有限公司, 山东 东营 257091; 3. 国网山东省电力公司即墨供电公司, 山东 即墨 266200; 4. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257091)

**摘要:** 为了更好地解决含 DG 的配电网重构问题, 建立了以系统损耗、负荷均衡、电压偏差为目标的重构模型, 并利用改进萤火虫算法进行寻优计算。针对传统萤火虫算法中存在的早熟收敛、过度依赖控制参数等缺陷, 引入了惯性权重, 利用混沌理论对算法参数进行调整, 使算法兼顾全局搜索与局部搜索能力的均衡。同时将精英保留策略融入到萤火虫算法当中, 加快了算法收敛的速度。为了减少网络重构中出现的大量不可行解, 对网络拓扑进行了简化操作, 缩短了编码维数, 提高了寻优效率。最后通过算例分析, 验证了该算法的有效性与实用性。

**关键词:** 配电网重构; DG; 改进萤火虫算法; 混沌优化搜索; 拓扑优化

## A distribution network reconfiguration method with distributed generation based on improved firefly algorithm

XU Zhe<sup>1</sup>, PAN Jinsheng<sup>2</sup>, FAN Shuxian<sup>1</sup>, SONG Xiaoshuang<sup>3</sup>, ZHAI Shuang<sup>4</sup>, GONG Maofa<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. The Limited Company of Dongying Fangda about Electric Power Design and Planning, Dongying 257091, China; 3. State Grid Shandong Jimo Electric Power Company, Jimo 266200, China; 4. State Grid Shandong Dongying Electric Power Company, Dongying 257091, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of distribution network reconfiguration with Distributed Generation (DG), a reconfiguration model aiming at system loss, load balancing and voltage deviation is established, and the improved firefly algorithm is used to optimize the calculation. In view of the defects of traditional firefly algorithm, such as premature convergence and over-reliance on control parameters, the inertia weight is introduced and chaotic theory is adopted to adjust the parameters of the algorithm so that the algorithm balances the global search and local search capabilities. At the same time, the elitist strategy is introduced into firefly algorithm which speeds up the algorithm convergence. In order to reduce a large number of non-feasible solutions in network reconfiguration, by simplifying the network topology, the coding dimension is shortened and the efficiency of optimization is improved. Finally, some examples are given to verify the effectiveness and practicability of the proposed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703242).

**Key words:** reconfiguration of distribution network; DG; improved firefly algorithm; chaotic optimization search; topological simplification

## 0 引言

配电网重构是配网实现优化运行的一种重要手段, 在数学上属于多目标非线性混合优化问题。它主要是通过改变联络开关、分段开关这两类开关的

投切状态来调整网络的拓扑结构, 进而对潮流分布产生影响, 最终达到减小网损、平衡负荷、改善电能质量等目的。配电网重构可分为正常状态下的优化重构和故障状态下的隔离恢复, 本文讨论的内容属于前者的范畴。

分布式电源(Distributed generation, DG)接入配电网后, 具有良好的经济效益与环境效益。它在一定程度上可以起到改善配电网电压水平的作用, 但

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61703242)

是由于 DG 出力的随机性、间歇性等特点, 也会给系统带来功率反向流动、电能质量降低等诸多不利影响<sup>[1-2]</sup>。因此在保障配网系统安全稳定运行的前提下, 如何更好地发挥 DG 的作用, 成为配电网重构中亟待解决的问题。

近几年来已有不少专家学者在配电网重构问题上进行了大量探索, 有关解决配电网重构问题的研究算法可分为数学优化算法<sup>[3-6]</sup>、启发式算法<sup>[7-9]</sup>和人工智能算法<sup>[10-14]</sup>三大类。其中, 文献[3]提出了一种判别随机配网重构的方法, 该方法基于边界分析, 通过随机潮流模拟与最小二乘技术, 从长期角度对网络进行评价, 但不适用于处理系统规模大、复杂程度高的场景; 文献[7]提出了采用无向生成树的并行遗传算法以实现配电网重构模型的并行求解, 能比较充分地描述以风电、光伏为代表的不可控型分布式电源出力的不确定性, 有助于降低系统网损, 有效改善馈线末端节点电压分布, 缓解节点电压越限, 但其稳定性不足, 算法过度依赖于初始状态, 难以搜寻到最优解; 文献[10]对遗传算法进行了改进, 从相同等效长度的染色体段开始进行交叉, 变异过程则采用随机分配断开开关点的方法, 减少了配电网重构过程中产生的不可行解的数量和迭代次数, 但算法极易陷入“早熟收敛”的怪圈。

本文综合考虑以上情况, 建立了以系统网损、负荷均衡、电压偏差三种指标为目标函数的含 DG 配电网重构数学模型, 同时为了简化计算, 将各种 DG 等效为“负”的负荷, 并作 PQ 节点处理; 在重构之前采取的拓扑优化操作, 降低了解的维数, 进而提高了搜索效率; 为了跳出局部最优并提高算法的局部搜索能力, 在传统萤火虫算法的基础上引入了惯性权重, 利用混沌优化的随机性与遍历性, 优化位置更新规则, 提出了自适应规则的混沌局部搜索优化策略; 类似遗传算法中精英保留策略的加入, 更加有效地提高了收敛速度。

## 1 配电网重构数学模型

### 1.1 目标函数

为了提高配电网运行的经济性与供电的安全性, 本文建立了以系统网损、负荷均衡、电压偏差三大综合指标为目标函数的配电网重构数学模型, 具体分析如下所述。

(1) 目标函数之网损最小

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} k_i r_i \quad (1)$$

式中:  $i$  为支路编号;  $n$  为网络中支路总数;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为第  $i$  条支路末端流过的有功功率与无功功

率;  $U_i$  为第  $i$  条支路的末端节点电压;  $k_i$  表示第  $i$  条支路上的开关状态, 0 表示断开, 1 表示闭合;  $r_i$  为第  $i$  条支路上的电阻;  $f_1$  表示系统网损。配电网系统网损越小, 经济性越好。

(2) 目标函数之负荷均衡

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^m \left( \frac{S_j}{S_{j\max}} \right)^2 \quad (2)$$

式中:  $j$  为支路编号;  $m$  为配电网中闭合的支路总数;  $S_j$ 、 $S_{j\max}$  分别表示第  $j$  条支路注入的复功率和最大允许复功率;  $f_2$  表示负荷均衡度。配电网中负荷均衡度越小, 负荷越均衡, 网络稳定性越高。

(3) 目标函数之电压偏差

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^k \frac{(U_{ts} - U_{tN})^2}{U_{tN}^2} \quad (3)$$

式中:  $t$  为节点编号;  $k$  为网络中的节点总数;  $U_{ts}$ 、 $U_{tN}$  分别表示第  $t$  个节点的实际电压与额定电压;  $f_3$  表示电压偏移量。配电网中电压偏移量越小, 电气设备的使用寿命越长。

(4) 目标函数之归一化处理

为了更好地达到配电网重构中多目标优化的目的, 本文对上述三大指标进行归一化处理。由于人为固定权重存在着较强的主观性, 所以本文采用了随机权重分配方式<sup>[15]</sup>, 以保证目标解的多样性。随机权重公式为

$$\varphi_i = \frac{\text{rand}_i}{\sum_{i=1}^3 \text{rand}_i} \quad (4)$$

式中,  $\text{rand}_i$  为(0, 1)随机生成数。

采用了随机权重后, 对三大目标函数的归一化处理为

$$f = \varphi_1 \frac{F_1}{f_1} + \varphi_2 \frac{F_2}{f_2} + \varphi_3 \frac{F_3}{f_3} \quad (5)$$

式中:  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_3$  分别表示三大综合指标的随机权重;  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  分别表示三个目标函数每次迭代的最小值。

### 1.2 约束条件

建立了目标函数后, 在配电网重构过程中, 还必须满足以下约束条件<sup>[16]</sup>。

(1) 等式约束

等式约束条件主要是潮流方程约束。

$$\begin{cases} \Delta P = P_{Gi} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q = Q_{Gi} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别表示第  $i$  个节点 DG 注入的有功与无功功率； $V_i$  表示第  $i$  个节点的电压幅值； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别表示两节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和电压相角差。

### (2) 不等式约束

不等式安全运行约束主要包括节点电压约束、支路功率约束以及网络辐射状拓扑约束。

$$U_{i-\min} \leq U_i \leq U_{i-\max} \quad (7)$$

$$S_i \leq S_{i-\max} \quad (8)$$

$$g_k \in \mathbf{G} \quad (9)$$

式中： $U_{i-\min}$ 、 $U_{i-\max}$  分别为节点  $i$  允许的最低与最高电压幅值； $S_i$ 、 $S_{i-\max}$  分别为支路  $i$  流入的复功率值与最大允许复功率值； $g_k$  表示经重构后的网络结构； $\mathbf{G}$  表示所有满足辐射状要求的网络结构的集合。

### 1.3 DG 潮流计算模型

DG 接入配电网之后，使得配电网的潮流计算更加复杂。由于 DG 与配网互联的接口方式不同，所以在潮流计算中 DG 可作为 PQ、PV 或 PI 节点处理。例如：内燃机、传统燃气轮机等 DG 采用同步发动机、恒功率因数控制的处理为 PQ 节点，而采用电压控制逆变器作为并网装置的 DG 则作为 PV 节点处理；采用电流控制逆变器作并网装置的光伏发电系统和储能系统，常处理为有功输出和注入电网电流恒定的 PI 节点。

由于各种节点类型都可以通过一定的方式转化为 PQ 节点，所以在本文的配电网重构中，也将 DG 等效为“负”的负荷，并作 PQ 节点处理<sup>[17]</sup>。

## 2 改进萤火虫优化算法

### 2.1 标准萤火虫优化算法

萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)是一种新型的群智能算法。它通过模拟自然界中萤火虫的群体行为来实现优化求解，具有计算效率高、设置参数少、操作简单等优点。在配电网重构问题中，目标函数的优化和求解过程也就是萤火虫之间的相互吸引、位置移动、优胜劣汰的过程。

在算法的优化过程中，主要由亮度与吸引度来决定萤火虫之间的相互吸引。某一个体萤火虫的亮度越高，表示其目标函数所处的位置越优越，对其他萤火虫个体具有越强的吸引力。亮度最高的萤火虫即代表函数的最优解。萤火虫相对荧光亮度与吸引度数学表达式为

$$\begin{cases} I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}} \\ \beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $I_0$ 、 $\beta_0$  分别表示萤火虫的最大亮度与最大吸引度； $\gamma$  表示光强吸收因子，萤火虫的亮度会随着传播介质的吸收而逐渐减少，一般  $\gamma$  设为常数； $r_{ij}$  表示两只萤火虫  $i$ 、 $j$  间的笛卡尔距离，萤火虫的亮度会随着空间距离的增加而逐渐减少。

每一次的迭代中，萤火虫的位置会不断更新，随着位置的更新，问题的求解精度也在不断的优化。萤火虫  $j$  被  $i$  吸引到  $i$  所在位置的更新公式为

$$X_j(t+1) = X_j(t) + \beta_{ij}(X_i(t) - X_j(t)) + \alpha \varepsilon_j \quad (11)$$

式中： $t$  表示迭代次数； $X_i$ 、 $X_j$  分别代表萤火虫  $i$ 、 $j$  的空间位置； $\beta_{ij}$  表示萤火虫  $i$ 、 $j$  之间的相对吸引力； $\alpha$  表示[0, 1]的随机常数； $\varepsilon_j$  表示由均匀分布得到的随机数向量。

### 2.2 改进萤火虫优化算法

由于标准萤火虫算法在迭代后期，随着萤火虫之间距离的减小，它们之间的相对吸引力逐渐增大，使得萤火虫算法的局部搜索能力变弱，并且有可能在极值点附近出现反复振荡的现象；同时在迭代后期，个体的多样性变差，收敛速度变慢，极易出现“早熟收敛”。

为了解决传统萤火虫算法的不足，本文对 FA 算法进行了如下改进。

#### (1) 引入惯性权重因子

在式(11)的位置更新公式中，虽然在最后加入了带有特定系数的随机项，在一定程度上抑制了局部振荡的延续，但有可能所需的迭代次数过多，无法满足精度要求。为了提高 FA 算法的局部搜索能力，考虑引入惯性权重<sup>[18]</sup>，将位置更新公式作如下改进：

$$X_j(t+1) = \omega(t)X_j(t) + \beta_{ij}(X_i(t) - X_j(t)) + \alpha \varepsilon_j \quad (12)$$

式中， $\omega(t)$  为惯性权重因子，一般取值为[0,1]的常数。在每次迭代中，惯性权重因子的取值决定了萤火虫  $t$  位置对下一步更新位置的影响比重。

#### (2) 混沌优化搜索

混沌理论具有随机性、遍历性和规律性的特点，为了进一步克服 FA 算法局部搜索能力差和早熟收敛的不足，本文采用混沌优化搜索策略以增加种群个体的多样性，让精英个体及时跳出局部最优解的陷阱，继续进行协同进化、迭代搜索。

在标准 FA 算法中，三大控制参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  在整个迭代过程中没有发生任何变化，使得算法在迭代后期往往会陷入局部最优。本文在引入惯性权重因子基础上，采用混沌 Logistic 映射函数<sup>[19]</sup>对 FA 算法相应参数进行控制调整，使其在迭代过程中随

机变化, 从而提高了算法的全局寻优能力。改进后的位置更新公式如式(13)所示。

$$\begin{cases} X_j(t+1) = \omega(t)X_j(t) + \\ \beta_{ij}(X_i(t) - X_j(t)) + \alpha(t)\varepsilon_j \\ \beta_{ij} = \beta_0 e^{-\gamma(t)t_{ij}^2} \\ \alpha(t+1) = \mu_1 \gamma(t)[1 - \alpha(t)] \\ \gamma(t+1) = \mu_2 \gamma(t)[1 - \gamma(t)] \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  为混沌控制参数值, 将其设置为  $[\mu_1, \mu_2] = [4, 4]$ 。混沌控制参数值对  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  都会产生一定影响, 从而使之在迭代中随机取值, 有利于算法跳出局部收敛的陷阱。结合惯性权重因子的引入, 改进后的 FA 算法可以兼顾局部寻优与全局寻优的均衡。

### (3) 采用精英保留策略

针对标准 FA 算法在迭代后期会出现敛速变慢的问题, 本文采用类似遗传算法选择操作中的精英保留策略, 即上一代的最优解不需进行配对交叉而直接复制到下一代中, 从而避免了最优个体因选择、交叉和变异操作遭到丢失和破坏。其具体操作如下: 首先选择初始种群规模为  $m$ , 随机产生  $n$  个个体; 然后对这些个体进行交叉配对、进化和变异操作, 产生新一代的种群; 最后对新一代个体进行适应度

评价, 找出其中的精英个体与适应度最差的个体。如果保留的精英个体适应度低于子代精英个体, 则表示种群已经进化, 否则将子代适应度值最好的个体去替换之前保留的精英个体, 同时之前的精英个体用以替换子代最差个体。精英保留策略加快了算法的收敛速度, 提高了算法的效率。

## 3 含 DG 的配电网重构策略

### 3.1 网络拓扑优化

由于本文采用“0-1”二进制的编码方式(0 表示开关断开, 1 表示闭合)会产生大量不符合配电网辐射状约束的不可行解, 所以简化拓扑、降低搜索空间成为提高算法寻优效率的重中之重。为了在编码时达到上述目的, 本文对配电网进行如下简化处理。

- (1) 不在任一基本环路之内的独立支路, 不参与编码操作;
- (2) 对于与电源节点直接相连的开关, 不考虑其断开情况;
- (3) 由于维度不大于 2 的节点间的支路组合解环效果相同, 所以在编码时将上述节点所属支路合并为一条支路, 即只保留维度为 3 的节点。

以 IEEE33 节点系统为例, 基于上述三条简化原则, 将原网络图化简为图1。

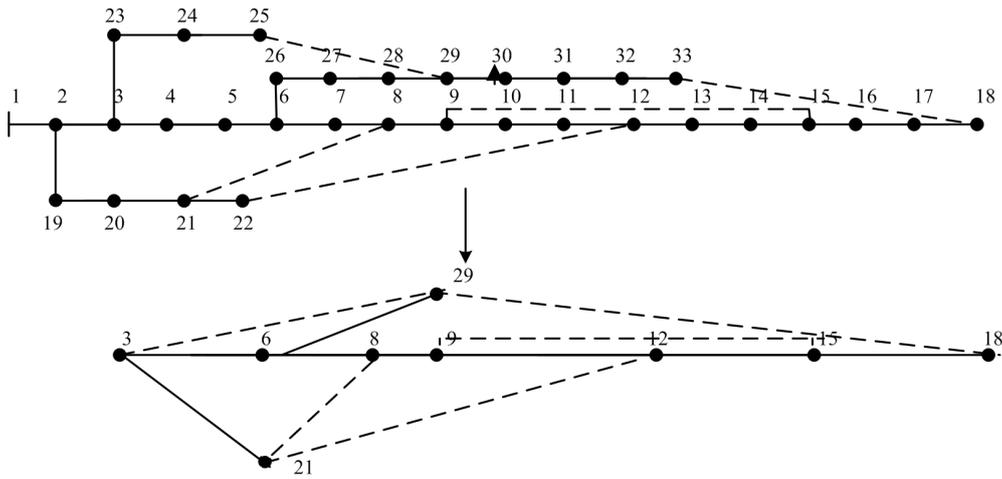


图 1 IEEE33 节点系统简化拓扑图

Fig. 1 IEEE33 nodes system simplified topological diagram

由图1可以看出, 支路1-2、2-3、4-5、5-6等支路组均可进行忽略或合并。这样, 原有的33节点经简化后仅变为9个节点, 解向量由原来的37维简化为13维, 大大降低了编码维数, 减少了大量不可行解的产生, 提高了算法寻优效率。

在拓扑搜索方面, 目前常用的方法主要有深度

优先搜索和广度优先搜索两种算法。为了结合两种算法的优点, 本文采用文献[20]提出的组合搜索算法, 即在广度优先搜索的基础上, 结合深度优先搜索中纵向深入的思想, 采用多层次循环嵌套的方法, 既能够减少寻优的时间, 也能进一步压缩搜索空间, 实现了时间和空间上的双重优化。

### 3.2 算法流程

基于改进萤火虫算法的含 DG 配电网重构方案具体如下所述。

(1) 配电网数据的初始化。配电网原始信息的读入, 比如节点数、开关数、支路阻抗、节点功率等。

(2) 根据本文制定的3条拓扑优化基本原则进行网络化简, 以达到降低搜寻空间、提高寻优效率的目的。

(3) FA算法的初始化。确定算法中的基本参数, 比如初始种群规模、最大迭代次数等相关信息。

(4) 根据随机生成的萤火虫的初始位置即各负荷节点功率信息, 计算其适应度值赋予个体的亮度, 并根据式(10)计算各萤火虫的吸引度。

(5) 判断是否达到最大迭代次数, 若超过最大迭代次数则跳到步骤(8), 反之则继续进行步骤(6)。

(6) 引入惯性权重, 采取混沌控制策略与精英保留策略, 根据式(13)更新萤火虫的空间位置, 通过比较, 记录适应度值最优的个体以及最优适应度值。

(7) 判断迭代次数是否越限, 若超过最大迭代次数则停止迭代、输出结果, 反之则返回步骤(4)继续进行迭代操作。

(8) 输出重构方案与结果。

## 4 算例分析

为了验证本文算法的可行性和准确性, 以图1中的IEEE33节点系统为例, 在Matlab R2014a仿真环境下进行分析。现初始参数设置如下: 1) 网络初始参数: 该配电系统含33个节点, 37条支路和5个联络开关, 额定电压为12.66 kV, 系统总负荷为 $3715+j2300$  kV·A, 其他详细网络参数可参照文献[21]; 2) 算法初始参数: 种群规模设为30, 最大迭代次数为50, 设置 $\alpha=0.25$ ,  $\beta=0.3$ ,  $\gamma=1$ , 惯性权重 $\omega=0.6$ , 混沌控制参数 $\mu_1=\mu_2=[4,4]$ 。DG的接入位置与容量如表1所示。

表 1 DG 接入位置及其容量

Table 1 Installation and capacity of DG

DG 类型	接入位置	容量	功率因素
燃气轮机	4	50	0.8
光伏	7	100	1.0

若上述 DG 均可提供最大出力, 参考 1.3 节的 DG 模型作等效处理。根据之前设置的初始参数, 采取第 3 节的重构策略, 按照是否有 DG 接入、则重构前后的实验结果对比见表 2。

由表 2 可见, 在不接入 DG 的情况下, 重构后的网损相对于重构之前降低了约 31%, 降损效果明

显; 另外在负荷均衡与电压偏差方面, 重构后的数据相应分别减少了 37%和 56%, 系统的稳定性增强。而在接入 DG 之后, 相比于没有接入 DG, 在降低网损、维持负荷均衡、减小电压偏差三大指标方面也均有显著改观。

表 2 重构结果对比

Table 2 Comparison of reconstruction results

场景	重构方案	网损/ kW	负荷 均衡度	电压偏 差/p.u.
无 DG 重构前	断开 8-21、9-15、 12-22、18-33、25-29	202.68	1.084	0.120
无 DG 重构后	断开 7-8、14-15、 9-10、32-33、28-29	139.93	0.673	0.052
有 DG 重构前	断开 7-8、14-15、 9-10、32-33、28-29	108.32	0.536	0.036

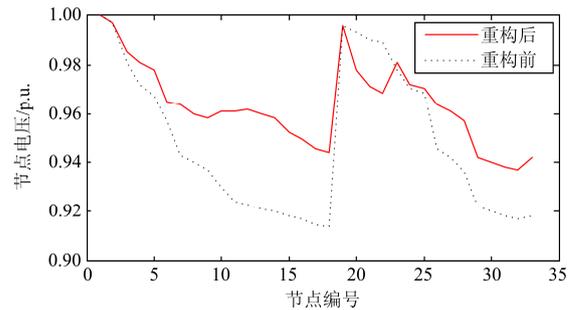


图 2 重构前后各节点电压比较曲线图(不含DG)

Fig. 2 Voltage comparison before and after reconfiguration (without DG)

图 2 是不接入 DG 时重构前后系统各节点电压的比较曲线图。从图 2 中可看出, 相比重构之前, 经重构后的网络节点电压在整体上普遍有所提升, 进而增强了系统的稳定程度。表 3 给出的是本文算法对比遗传算法与粒子群算法, 三者平均迭代次数与平均耗时上的对比数据。从表 3 中可看出, 本文采用的改进萤火虫算法不仅在平均迭代次数上少于另外两种给定的智能优化算法, 而且达到收敛时所用的寻优时间短, 说明本文采用的算法能够有效均衡全局搜索与局部搜索能力, 并具有极高的计算速率。

表 3 算法性能对比

Table 3 Performance of algorithms

算法	平均迭代次数	平均耗时/s
遗传算法	15	18.35
粒子群算法	16	20.45
本文算法	12	8.65

## 5 结论

(1) 在含 DG 的配电网重构中, 本文以改善系统网损、实现负荷均衡和减小电压偏差三大指标为目标函数, 并采用随机权重法做归一化处理。相比不含 DG 的重构, 本文提出的重构策略在降低网损、维持负荷均衡、提高电压质量等方面均有显著成效。

(2) 针对传统 FA 算法中出现的早熟收敛、收敛速度过慢等问题, 本文采用的改进萤火虫算法在标准 FA 的基础上, 引入了惯性权重, 提高了算法的局部寻优能力; 采取的混沌优化搜索和精英保留策略, 提高了算法的全局搜索能力并加快了寻优速度。

(3) 为了减少网络中大量不可行解的产生, 本文提出了 3 条拓扑简化规则并采用新的组合搜索算法, 降低了搜索空间, 提高了算法搜索的效率。仿真结果验证了本文算法的准确性与可行性。

## 参考文献

- [1] 苏剑, 刘海涛, 吴鸣, 等. 分布式电源与微电网并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] LI Jianlin, XUE Yushi, TIAN Liting, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [3] 李春燕, 钟隽, 许中. 基于边界分析和线性回归的随机配电网重构判别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 176-180.  
LI Chunyan, ZHONG Jun, XU Zhong. A test method for stochastic distribution system reconfiguration using boundary analysis and linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 176-180.
- [4] MARTI J R, AHMADI H, BASHUALDO L. Linear power-flow formulation based on a voltage-dependent load model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1682-1690.
- [5] AHMADI H, MARTI J R. Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 25-33.
- [6] 汪芳宗, 王兆丰. 基于混合整数二次锥规划方法的含分布式电源配电网优化重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 24-30.  
WANG Fangzong, WANG Zhaofeng. An optimum reconfiguration method for distribution networks with DG based on mixed integer second-order cone programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 24-30.
- [7] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96.  
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [8] 张剑, 何怡刚. 基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 136-141.  
ZHANG Jian, HE Yigang. Genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 136-141.
- [9] 林济铿, 刘阳升, 潘毅, 等. 基于 Mayeda 生成树实用算法与粒子群算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6150-6158.  
LIN Jikeng, LIU Yangsheng, PAN Yi, et al. Mayeda spanning tree practical method combined with particle swarm algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6150-6158.
- [10] 陈宁, 刘宪林, 梁欢欢. 基于改进遗传算法的配电网重构研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(13): 101-104.  
CHEN Ning, LIU Xianlin, LIANG Huanhuan. Research on the reconfiguration of distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement Instrumentation, 2015, 52(13): 101-104.
- [11] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.  
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [12] JABR R A. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1106-1115.
- [13] 卢扬, 吴俊勇, 郝亮亮. 基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 62-68.  
LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 62-68.

- 62-68.
- [14] ESMAEILIAN H R, FADAEINEDJAD R. Energy loss minimization in distribution systems utilizing an enhanced reconfiguration method integrating distributed generation[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1430-1439.
- [15] 陈正鹏, 黄纯, 张亚萍, 等. 基于改进双种群遗传算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 78-83.  
CHEN Zhengpeng, HUANG Chun, ZHANG Yaping, et al. Distribution network reconfiguration with different distributed generations based on improved dual population genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 78-83.
- [16] RATNAWEERA A, HALGMUGE S, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [17] 邹必昌. 含分布式发电的配电网重构及故障恢复算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.  
ZOU Bichang. Study on the algorithm of distribution network reconfiguration and service restoration with distributed generations[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [18] 王吉权, 王福林. 萤火虫算法的改进分析及应用[J]. 计算机应用, 2014, 34(9): 2552-2556.  
WANG Jiquan, WANG Fulin. Improvement analysis and application of firefly algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(9): 2552-2556.
- [19] 陈家俊, 蒋铁铮, 周勇, 等. 考虑电压骤降的分布式电源定容和选址[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2244-2249.  
CHEN Jiajun, JIANG Tiezheng, ZHOU Yong, et al. Reasonable allocation of distributed generation in distribution system considering voltage sag[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2244-2249.
- [20] 栾伟杰, 程浩忠, 杨国健, 等. 考虑网络重构的配电网多目标运行方式优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 1-7.  
LUAN Weijie, CHENG Haozhong, YANG Guojian, et al. Multi-objective operation mode optimization for distribution network using network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(10): 1-7.
- [21] 马草原, 孙展展, 尹志超, 等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 120-128.  
MA Caoyuan, SUN Zhanzhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 120-128.

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-02-28

作者简介:

许喆(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电系统及其自动化技术; E-mail: 845041016@qq.com

潘金生(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统规划设计、咨询及工程建设等工作; Email: 21249343@qq.com

樊淑娴(1984—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统继电保护。Email: 15166067888@163.com

(编辑 姜新丽)