

# 基于群搜索优化算法的配电网重构

李鹏, 江辉, 孙芊, 周娟

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

## Distribution Network Reconfiguration Based on Group Search Optimizer

LI Peng, JIANG Hui, SUN Qian, ZHOU Juan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** A new method for distribution networks reconfiguration based on group search optimizer (GSO) is proposed. In the population the individual with minimal network loss is chosen as the discoverer, and the residuals are respectively chosen as entrants and stragglers. During the searching, the local physical search of discoverer is performed by quick branch-exchange method, and the entrants are close to the discoverer step by step to carry out following search in the solution space. The proposed method realizes satisfied coordination of global search with local search, thus the searching efficiency is improved and a better global convergence is implemented. Results of IEEE 69-bus system verify the effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** distribution networks reconfiguration; group search optimizer (GSO) algorithm; branch-exchange method

**摘要:** 提出了基于群搜索优化算法的配电网重构方法, 以系统有功网损最小为目标建立了配电网重构模型, 选择种群中网损最小的个体为发现者, 剩余个体分别作为加入者和游荡者。在寻优过程中, 应用快速支路交换法对发现者进行局部物理寻优, 加入者向发现者逐步靠近执行追随搜索, 游荡者在解空间中随机搜索。该方法实现了全局搜索与局部寻优的良好配合, 提高了搜索效率, 具有较好的全局收敛性。算例结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 配电网重构; 群搜索优化算法; 支路交换法

## 0 引言

为灵活可靠供电, 配电网一般采用闭环设计、开环运行的方式, 配电网包含大量的常闭分段开关和少量的常开联络开关。当负荷发生变化或出现故障时, 需要及时改变开关的开合状态以进行网络重构, 隔离故障, 改善电压分布状况, 确保配电网安全经济运行。

目前配电网重构方法众多, 如支路交换法<sup>[1-2]</sup>和最优流模式法<sup>[3]</sup>, 该类算法优化速度快、实现简

单, 但优化结果与网络初始结构和开关打开顺序有关, 并且由于使用不合理的启发式规则, 缺乏数学意义上的全局最优性, 易收敛于局部最优解。近年来人工智能算法因其不依赖于初始结构、能以较大概率收敛于全局最优解而在配电网重构中得到了广泛应用。人工智能算法中, 遗传算法<sup>[4-7]</sup>收敛速度慢, 局部寻优能力差; 模拟退火方法<sup>[8]</sup>温度难以控制且计算量大; 禁忌搜索法<sup>[9]</sup>的全局寻优能力受禁忌长度影响较大; 粒子群算法<sup>[10]</sup>易早熟收敛; 蚁群算法<sup>[11]</sup>计算时间长。群搜索优化(group search optimizer, GSO)算法<sup>[12]</sup>由 S. He 和 Q. H. Wu 提出<sup>[12]</sup>, GSO 算法具有原理简单、计算速度快、收敛性好、易于获得全局最优解等优点, 已在函数优化、神经网络训练等领域得到应用。为此, 本文提出基于 GSO 算法的配电网重构方法, 该方法能够快速改进寻优方向, 有效避免早熟, 易获得全局最优解。

## 1 配电网重构数学模型

配电网重构目标多为系统有功网损最小、负荷均衡、提高供电可靠性等。本文以系统有功网损最小为目标进行重构, 其目标函数为

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

式中:  $b$  为支路总数;  $k_i$  为支路  $i$  的开关状态变量,  $k_i$  为 0 表示开关断开,  $k_i$  为 1 表示开关闭合;  $r_i$  为支路  $i$  的电阻;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为支路  $i$  的有功功率和无功功率;  $U_i$  为支路  $i$  末端的节点电压。

配电网重构还须满足以下约束条件:

1) 支路容量约束。

$$S_i < S_{i\max} \quad (2)$$

式中： $S_i$ 为支路*i*的功率； $S_{i,max}$ 为支路*i*允许传输的最大功率。

2) 节点电压约束。

$$U_{j,min} \leq U_j \leq U_{j,max} \quad (3)$$

式中  $U_j$ 、 $U_{j,max}$ 、 $U_{j,min}$  分别为节点  $j$  的电压及其上下限。

3) 重构后网络必须为辐射状，即无“回路”和“孤岛”。

### 2 GSO 算法

GSO 算法模拟动物觅食行为寻找解空间中的最优点即食物所在位置，是群体智能的体现。群居动物的觅食策略主要有：1) 发现，即发现食物；

2) 加入，即加入(追随)发现食物的个体寻找食物；

3) 游荡，即随机游荡搜寻食物。根据觅食策略可将群成员分为3类：发现者、加入者和游荡者。

GSO 算法中，首先随机产生一定规模的初始种群，每次迭代中，选择适应值最优的个体为发现者，即在该位置的个体最有可能发现食物；然后通过随机变换发现者的搜索方向对周围区域进行局部搜索，若搜索位置的适应值比当前发现者位置的适应值更优，则发现者运动至该位置，否则发现者位置不变。若搜索后未找到更好位置，则结束发现者局部搜索行为。

除发现者外，随机选择一部分个体作为加入者，加入者朝发现者位置前进，并同时在向发现者靠近的路径上搜索食物。群体中剩余成员为游荡者，它们在觅食区域朝任意方向随机游弋。在加入者和游荡者搜索过程中，若某个体所处位置比当前发现者以及其余个体位置更优，则下次迭代时该个体将转变为发现者。

在整个迭代过程中，发现者保持了当前最佳位置，加入者一直追随发现者进行搜索，而游荡者在解空间中随机搜索，从而避免了陷入局部最优。

### 3 配电网重构

#### 3.1 开关编码

由于开关组合方案众多，因此配电网重构为大规模、非线性组合优化问题，本文在运用 GSO 算法进行寻优时，采用按坐标搜索的方式，减少了计算量，提高了算法性能。

本文采用十进制编码方案。配电网中，单独闭合一个联络开关可形成一个单环，必须同时打开

该环中的一个分段开关才能保持配电网辐射状结构，因此分别在每个联络开关所确定的单环内对开关单独进行编号，不在任何环路内的开关以及直接与电源点相连的开关必须闭合，且编码时不予考虑。图 1 为 IEEE 典型三馈线测试系统，15、21、26 号开关为联络开关，11、16、20、22 号开关必须闭合，无需参与编码。

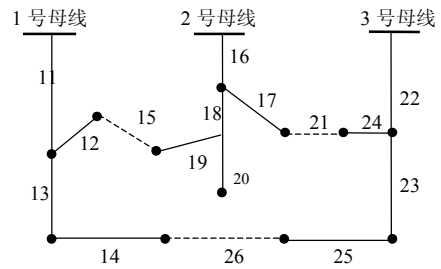


图 1 典型三馈线测试系统

Fig. 1 Typical test system with three feeders

根据上述编码策略，搜索空间维数即为联络开关的个数，每一维代表一个单环，该维上的坐标为其所代表单环的环内开关号。当个体在解空间中进行搜索时，个体所在点的坐标即为每个单环中所应打开开关的环内编号。

以图 1 网络为例，其对应的搜索空间如图 2 所示， $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴分别代表一个单环，括号外数字为坐标，括号内数字为该坐标所代表开关在整个网络中的编号。若打开 26、15、21 号开关，其余开关合上，则对应的个体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的坐标为(5,4,3)。这样解空间中所有整数坐标就覆盖了所有开关组合方案，并且对于环路间不含公共开关的网络没有不可行解产生。对于含有公共开关的复杂配电网，当多个单环同时打开公共开关时，可能会产生不可行解，但其不可行解数目按二进制编码规则形成的不可行解数目少许多，寻优效率较大提高。

#### 3.2 发现者局部寻优

对当前种群中所有个体进行潮流计算，选择其

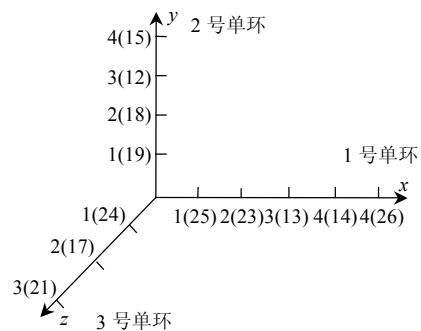


图 2 开关编码搜索空间

Fig. 2 Search space of the switches coding

中有功网损最小的个体为发现者，第  $k$  次迭代时发现者的坐标为  $\mathbf{X}_p^k$ 。

传统的人工智能算法存在局部寻优能力差、收敛速度慢的缺点。GSO 算法中，发现者指引种群的全局搜索方向，对于算法的收敛速度有着较大影响。为此本文采用计算简便的快速支路交换法<sup>[1]</sup>对发现者进行一次物理寻优，以改善局部搜索能力，提高收敛速度。快速支路交换法首先闭合某打开开关，然后在闭合开关所形成的单环内，根据最佳转移负荷的符号和大小打开单环最大降损开关，在保持网络辐射状的同时优化网络结构。

发现者局部寻优的具体步骤如下：

1) 在由发现者所确定的网络中，按开关两端电压差由大到小的顺序确定开关操作次序  $S_c$ 。

2) 若发现者结构与上次迭代时不同，则合上两端电压差最大的打开开关；否则按  $S_c$  所确定的次序闭合某尚未操作的打开开关。

3) 在闭合开关所形成的单环内，应用快速支路交换法打开能使该单环网损最小的开关。

4) 求出开关交换后的系统总网损，若比发现者的系统总网损小，则发现者更新为开关交换后的网络结构编码，否则发现者不变。

发现者进行局部寻优时，每次迭代仅进行一次开关交换以改进全局寻优方向。若  $S_c$  中所有打开开关均已操作而发现者仍未发生变化，则说明发现者已为局部最优甚至全局最优，无需再对其进行局部寻优。

### 3.2 加入者追随搜索

除发现者外，随机选择种群中 80% 的个体作为加入者，这些个体追随发现者在  $n$  维空间中进行搜索，每次迭代都朝着发现者的方向随机前进一段距离。若更新后位置为不可行解，则加入者返回原位置，重新执行追随搜索。由于开关号均为自然数，因此前进的距离必须为整数，则

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \mathbf{X}_i^k + R_{\text{ound}}[\mathbf{r}(\mathbf{X}_p^k - \mathbf{X}_i^k)] \quad , i \in M \quad (4)$$

式中： $M$  为加入者的成员集合； $\mathbf{r} \in \mathbf{R}^n$ ， $\mathbf{r}$  中元素为区间(0,1)上的随机数； $\mathbf{X}_i^k \in \mathbf{R}^n$  为第  $k$  次迭代时加入者  $i$  的坐标； $R_{\text{ound}}$  表示对括号内实数四舍五入。

在迭代过程中，加入者在向发现者靠近的路径上随机搜索各种开关组合方案。若某个加入者(或游荡者)的有功网损比原发现者以及其余个体的有功网损小，则该加入者在下次迭代时将被选为发现

者，而原发现者作为加入者与其余加入者一起执行追随搜索。

### 3.3 游荡者随机搜索

除发现者和加入者外，种群剩余个体作为游荡者在解空间中任意移动，随机搜索各种开关组合方案。当产生不可行解时，游荡者返回原位置，重新执行随机搜索。

游荡者位置更新公式为

$$\mathbf{X}_j^{k+1} = \mathbf{X}_j^k + F_{\text{ix}}[(\mathbf{a}_{\text{dd}}\mathbf{v}_1 - \mathbf{s}_{\text{ub}}\mathbf{v}_2)] \quad , j \in W \quad (5)$$

式中： $W$  为游荡者的成员集合； $\mathbf{X}_j^k \in \mathbf{R}^n$  为第  $k$  次迭代时游荡者  $j$  的坐标； $F_{\text{ix}}$  表示对括号内实数取整； $\mathbf{a}_{\text{dd}} \in \mathbf{R}^n$ ，为正数标志位向量，其各维变量取 0 或 1； $\mathbf{s}_{\text{ub}} \in \mathbf{R}^n$ ，为负数标志位向量，其各维变量取 0 或 1； $\mathbf{v}_1 \in \mathbf{R}^n$ ， $\mathbf{v}_2 \in \mathbf{R}^n$ ，且  $\mathbf{v}_1 = \min[(\mathbf{b}_{\text{ound}} - \mathbf{X}_j^k), \mathbf{l}_{\text{max}}]\mathbf{r}$ ， $\mathbf{v}_2 = \min(\mathbf{X}_j^k, \mathbf{l}_{\text{max}})\mathbf{r}$ ， $x_{ji}^k$  为  $\mathbf{X}_j^k$  第  $i$  维元素， $\mathbf{b}_{\text{ound}}$  为上界向量，其元素  $b_{\text{ound}i}$  为解空间  $i$  维上界即最大环内开关号， $\mathbf{l}_{\text{max}}$  为最大步长向量，其元素  $l_{\text{max}i}$  根据第  $i$  维开关个数设定。

### 3.4 算法步骤

算法流程如图 3 所示。算法具体步骤如下：

- 1) 读入配电网的基本数据。
- 2) 随机产生由  $m$  种开关组合方案组成的初始种群，通过潮流计算得到群体中每一个体的网损。
- 3) 选择初始种群中网损最小的个体为发现者，随机选择剩余成员中 80% 为加入者，其余 20% 为游荡者。
- 4) 对发现者进行局部物理寻优。

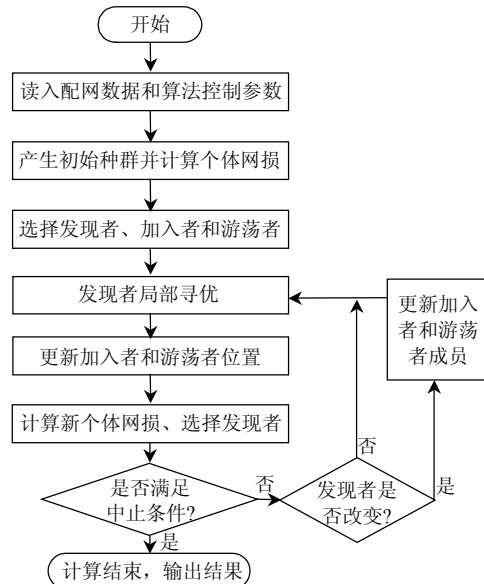


图 3 算法流程

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

5) 应用式(4)对加入者的位置进行更新, 应用式(5)对游荡者的位置进行更新。

6) 计算新种群中每一个体的网损, 选择网损最小的个体为发现者。如果满足收敛条件或达到最大迭代次数, 转步骤 8), 否则转步骤 7)。

7) 若发现者不变, 则维持原成员结构不变; 若原加入者成为新的发现者, 则原发现者变为加入者; 若原游荡者成为新的发现者, 则取加入者中网损最大的为游荡者而原发现者变为加入者。转步骤 4)。

8) 重构算法结束, 输出最优结构。

### 4 算例仿真

本文以 IEEE 69 配电系统为例进行仿真计算, 系统网络结构参见文献[13], 该系统共有 69 个节点、74 条支路和 5 个联络开关, 系统额定电压为 12.66 kV, 总有功负荷为 3.802 19 MW, 总无功负荷为 2.694 60 Mvar。设定种群规模为 30, 最大步长各维均为 10, 最大迭代次数为 50, 确定初始结构各联络开关所对应的单环, 并对单环上的开关进行分组编码, 搜索空间为 5 维。

表 1 为本文算法、文献[5]模糊遗传算法及文献[14]免疫算法的配电网重构结果。由表 1 可知, 应用本文算法进行重构后, 网损从重构前的 226.05 kW 降至重构后的 102.70 kW, 降损率为 54.57%, 并且节点电压质量得到改善, 最低节点电压从重构前的 0.909 2 pu 上升至重构后的 0.942 8 pu, 各节点电压均维持在较高水平。由于节点 45、46、47 有功负荷与无功负荷均为 0, 打开 44-45 支路上的开关与打开 47-48 支路上的开关是等效的, 因而本文方法与文献[5,14]方法重构结果基本一致, 能够获得全局最优解, 且本文最优结构的有功网损更小, 重构效果更好。

连续运行优化程序 50 次, 最快仅需 6 次迭代即可寻到最优结构, 搜索效率较高。某次测试中种

表 1 配电网重构结果

Tab. 1 Results after reconfiguration of distribution network

比较项目	打开开关集合	网损/ kW	最低节点电压/ 电压/pu	最低 节点号
重构前	11-66 13-20 15-69 39-48 27-54	226.05	0.9092	55
本文方法	11-66 18-19 13-12 47-48 50-51	102.70	0.9428	51
文献[5]方法	11-66 13-20 14-15 44-45 50-51	104.76	0.9428	51
文献[14]方法	11-66 13-20 14-15 47-48 50-51	104.76	0.9428	51

群个体的网损迭代情况如图 4 所示。由图 4 可知, 随着迭代次数的增加, 大部分个体的有功网损均在减小, 说明由发现者指引的寻优方向能够迅速向最优结构逼近。同时个体网损一直在最优结构的有功网损上方附近波动, 甚至个别个体网损波动幅度较大, 说明加入者和游荡者在搜索过程中很好地保持了种群多样性, 能够防止过早陷入局部最优。

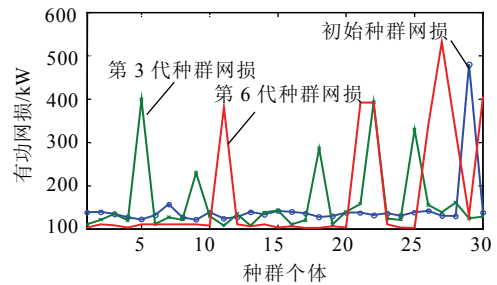


图 4 种群网损

Fig. 4 Population losses

本文算法、文献[5]算法和文献[14]算法寻优性能比较情况如表 2 所示。由于本文算法采用了十进制开关编码方式, 压缩了寻优空间, 并基于快速支路交换法对发现者首先进行局部物理寻优, 能够准确快速地改进寻优方向, 从而加速了算法收敛速度, 减少了算法对初始种群的依赖。同时游荡者在解空间中随机搜索, 有效避免了早熟收敛, 确保算法能以较大概率收敛于全局最优解。由表 2 可知, GSO 算法在求解上述配电网重构问题时, 种群规模较小时平均迭代次数最少, 寻优效率高。

表 2 算法性能比较

Tab. 2 Comparison of algorithms' performance

算法	种群规模	平均迭代次数
本文算法	30	10.2
模糊遗传算法	100	300
免疫算法	50	34

除 GSO 算法外, 典型的群集智能算法<sup>[15-18]</sup>还有粒子群算法、蚁群算法以及人工鱼群算法, 该类算法在机理上有相似之处。目前, 粒子群算法和蚁群算法已用于配电网重构领域, 但效果并不理想, 文献[19]中指出单独应用粒子群算法求解上述配电网重构问题时平均迭代次数为 77.5 次, 计算效率远低于本文算法, 且易早熟收敛, 需要结合图论理论以及其他寻优算法以提高算法性能, 算法原理较为复杂。蚁群算法仅适用于求解简单配电网的重构问题, 对于节点数众多的复杂配电网, 存在计算时间长的缺点。人工鱼群算法由于步长大小的设置对收敛速度和寻优精度有较大影响, 且对于大规模配电网, 其寻优空间较大、网损变化平坦, 降低了

鱼群的寻优效率。因此, 原理简单、搜索效率高的 GSO 算法能够更好地解决配电网重构问题。

## 5 结论

基于 GSO 算法的配电网重构方法利用基于物理启发式规则的快速支路交换法对发现者进行局部寻优, 大大减少了收敛迭代次数和对初始种群的依赖。本文算法将全局搜索与局部寻优、群集智能与物理寻优相结合, 能够提高搜索效率, 快速获得最优结构, 可有效解决配电网重构问题。

## 参考文献

- [1] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网络重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.  
Zhang Dong, Zhang Liuchun, Fu Zhengcai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85(in Chinese).
- [2] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.  
Bi Pengxiang, Liu Jian, Zhang Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution on networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103(in Chinese).
- [3] 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网络重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术, 1995, 19(7): 47-50.  
Deng Youman, Zhang Boming, Xiang Niande. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7): 47-50(in Chinese).
- [4] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网络重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.  
Bi Pengxiang, Liu Jian, Liu Chunxin, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61(in Chinese).
- [5] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.  
Liu Li, Chen Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69(in Chinese).
- [6] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配电网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 65-69.  
Ma Xiufan, Zhang Lizi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 65-69(in Chinese).
- [7] 余健明, 张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 100-105.  
Yu Jianming, Zhang Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 100-105(in Chinese).
- [8] Chiang H D, Jumeau R J. Optimal network reconfigurations in distribution systems, part 2: solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(3): 1568-1574.
- [9] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.  
Ge Shaoyun, Liu Zifa, Yu Yixin. An improved tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Power system Technology, 2004, 28(23): 22-26 (in Chinese).
- [10] 靳晓凌, 赵建国. 基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡化配电网重构[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 40-43.  
Jin Xiaoling, Zhao Jianguo. Distribution network reconfiguration for load balancing based on improved binary particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 40-43(in Chinese).
- [11] Ahuja A, Pahwa A. Using ant colony optimization for loss minimization in distribution networks[C]//37th Annual North American Power Symposium. Iowa, USA: 37th Annual North American Power Symposium, 2005: 470-474.
- [12] He S, Wu Q H. A novel group search optimizer inspired by animal behavioral ecology[C]//2006 IEEE Congress Evolutionary Computation. Vancouver, Canada: IEEE, 2006: 1272-1278.
- [13] 王超学, 崔杜武, 崔颖安, 等. 使用基于中医思想的蚁群算法求解配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 13-18.  
Wang Chaoxue, Cui Duwu, Cui Ying'an, et al. Distribution network reconfiguration using a novel ant colony system based on traditional chinese medicine theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 13-18(in Chinese).
- [14] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25-29.  
Meng Wenchuan, Qiu Jiaju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 25-29(in Chinese).
- [15] He S, Wu Q H, Saunders J R. Group search optimizer: an optimization algorithm inspired by animal searching behavior[J]. IEEE Trans on Evolution Computation, 2009, 13(5): 973-990.
- [16] 余贻鑫, 邱伟, 刘若沁. 基于启发式算法与遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 19-22.  
Yu Yixin, Qiu Wei, Liu Ruoqin. Distribution reconfiguration based on heuristic algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 19-22(in Chinese).
- [17] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.  
Liu Wei, Han Zhenxiang. Distribution network reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33(in Chinese).
- [18] 张雯秀, 滕少华, 李丽娟. 改进的群搜索优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(4): 48-51.  
Zhang Wenfen, Teng Shaohua, Li Lijuan. Improved group search optimizer algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(4): 48-51(in Chinese).
- [19] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.  
Liu Zifa, Ge Shaoyun, Yu Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78(in Chinese).



李鹏

收稿日期: 2010-06-09。

作者简介:

李鹏(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行与控制, E-mail: li-peng-3095@163.com;

江辉(1968), 女, 博士, 教授, 主要从事电力系统优化运行与控制、电力市场等研究。

(编辑 徐梅)