

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.05.004

# 改进遗传算法在分布式电源选址定容中的应用

周 淙, 曹立平, 李 剑, 郑柏林

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**提出了基于节点号的 Prüfer 数编码遗传算法,用于分布式电源的选址定容和配电网结构协同优化规划。利用图论生成配电网运行时理论上可行的树型拓扑结构,对其按 Prüfer 数原理编码;用整数编码方式对分布式电源的接入节点和安装容量进行编码,使配电网的结构优化和分布式电源选址定容合并为同一染色体基因的进化问题。此编码方法使染色体长度比支路开关二进制编码方式缩短;利用 Prüfer 数编码的优点对算法中交叉、变异操作进行一定的限制和改进,解决了其他编码方式在交叉、变异过程中容易产生非法解及修复难的问题,提高了算法效率和收敛速度。最后,通过实例计算验证了此算法的可行性和优越性。

**关键词:**选址定容;配电网规划;分布式电源优化;遗传算法;Prüfer 数编码

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)05-022-07

## Application of improved genetic algorithm to locating and sizing of distributed generation

ZHOU Quan, CAO Liping, LI Jian, ZHENG Bolin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A Prüfer-coded genetic algorithm based on the decimal number of nodes is proposed and it is used to solve collaborative optimization planning of access solution of distributed generation(DG)and structure of distribution network. Using graph theory to generate theoretically feasible topology structure, and the access nodes and the installed capacity of distributed generation are coded by the Prüfer number. The coding method makes the distribution network operation structure and the access solution of DG combine into the evolution problem of the same chromosomal gene. The length of the chromosome coding of this method is shorter than binary encoding. This solution takes full advantage of the Prüfer-coded to improve computational efficiency and convergence rate, and makes some restrictions and improvements in some key parts of the algorithm to solve the problem illegal solution. Finally, feasibility and superiority of the algorithm is validated by a case study.

**Key words:** locating and sizing; distribution network planning; distributed generation optimization; genetic algorithm; Prüfer number coding

**收稿日期:** 2013-12-18

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215205); 国家创新研究群体基金资助项目(51021005)

**作者简介:** 周淙(1973-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电气设备在线监测与故障诊断、配电网优化、智能电网研究,(E-mail)zhouquan@cqu.edu.cn。

随着电力需求的不断增加和人们对环境问题的日益关注,利用可再生清洁能源的分布式电源研发投入逐渐增加,相关技术和配套设备基本成型,分布式发电一定会成未来智能电网和微型电网发展的一个重要组成部分。具有高供电可靠性的自动化智能配电网都要设计成可多路供电的多环网结构,可以在多种开环方式下运行,在负荷变化或出现故障时,配电网能根据预先设定的运行指标最优化自动地断开、关合相应线路联络形成新的开环运行结构<sup>[1-3]</sup>。分布式电源的接入会使配电网的节点电压、网络损耗等发生较大变化,使得稳态电压、有功损耗不仅与节点负荷大小有关,还与 DG 的接入位置以及容量有关,因此有必要对 DG 的选址定容问题进行深入研究。

文献[4]利用改进多组织粒子群进行变电站选址定容优化得到较好的效果。文献[5]在这一算法基础上,提出利用混合模拟退火算法来改进算法。文献[6]提出将 DG 作为可调度设备,通过粒子群算法优化调度 DG 注入配电网功率。文献[7]对输出不稳定的分布式风力发电采用植物生长模拟算法(PGSA)进行优化规划。文献[8]对有新增加负荷节点的配网拓扑结构固定的配电网,利用遗传算法对分布式电源的位置和容量进行初步优化,再对每个分布式电源位置和容量方案,利用基于支路交换的模拟退火算法进行经济性评估来衡量每个方案的优劣。

以上文献中研究 DG 的选址定容问题都是在固定的配电网结构下选取 DG 地址和容量,具有一定的片面性,只能搜索到该结构下的最优解<sup>[9]</sup>,而不能得到全局最优解,笔者提出了 DG 的选址定容和配电网结构协同进行优化规划,利用 Prüfer 数对配电网结构进行编码,对 DG 地址和容量整数编码,将两者在同一染色体基因中协同进化以找到全局最优解,同时较好地解决了遗传算法计算量大、收敛速度慢的问题。

## 1 分布式电源的优化模型

### 1.1 优化指标

配电网规划要从全局上综合均衡多种相互制约的指标,并且受各种条件约束使得问题相当复杂<sup>[10-12]</sup>,数学模型中可选择各种最佳指标,如线路有功损耗最小,运行费用最省,投资建设费用最小,供电电压质量,负荷均衡及综合目标函数<sup>[13]</sup>等。笔者基于已有配电网结构的研究<sup>[14-15]</sup>,假设分布式电站与配电网母线节点间线路距离为零;假设各处建设同等容量分布式电站建设费用相同;结合实际计划接入 DG 数量有限,并且不允许孤岛运行,所以选取线损减小和电压质量为目标函数<sup>[16]</sup>,即

$$f = \alpha \sum_j^b R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} + \beta \sum_{i=1}^n (U_{im} - U_{imset})^2, \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta$ 为相应指标所占权重,满足 $\alpha + \beta = 1$ ;  $b$ 为在运线路总数;  $n$ 为负荷节点总数;  $R_j$ 为线路  $j$  电阻;  $P_j, Q_j, U_j$ 分别为线路  $j$  末端有功、无功、电压;  $U_{imset}$ 为节点  $i$  额定电压标么值;  $U_{im}$ 为节点  $i$  运行时实际电压标么值。

### 1.2 条件约束

- 1) 线路输送容量约束  $I_j < I_{jmax}$ ,  $I_{jmax}$  为线路  $j$  最大长期允许电流。
- 2) 线路各节点电压约束:  $U_{imix} < U_i < U_{imax}$ ,  $U_{imix}, U_{imax}$  分别为节点  $i$  运行中允许的最低、最高电压值。
- 3) 配电网可接入分布式电站的额定容量和实际建站数量在数学模型中作为等式约束。

## 2 Prüfer 数编码改进的遗传算法

### 2.1 遗传算法

遗传算法已成为一种最常用的进化算法<sup>[17]</sup>,在各个领域都有研究和应用,选择算子的择优概率保证算法向着适应度最大(指标最佳)有向搜索,交叉、变异算子的随机性保证算法的随机搜索性能,使其能逃离局部最优<sup>[18]</sup>。算法最终收敛于全局最优解的前提是对解空间进行深度搜索和广度搜索中维持两者平衡,所以要慎重考虑遗传算法的编码方式、原始种群、算子参数等各组成部分<sup>[19-20]</sup>。

将实际问题抽象建模,编码方式是最影响遗传算法性能的关键,其目标是实现表现型空间到基因型空间的完美映射,非法解问题是遗传算法中普遍存在的一个难题。处于正常运行状态的配电网呈辐射结构,配电网设计为闭环结构,当所有分段开关和联络开关闭合,支路用弧来表示,节点用顶点表示时所形成的结构就是图型结构<sup>[21]</sup>。通过十进制编码<sup>[22]</sup>启发,将图论中求解最小生成树问题的十进制节点号 Prüfer 数编码方式

用于染色体编码,很好地解决了非法解问题。

## 2.2 编码、解码规则

对于一个顶点数为  $n$  无向安全连通图,其弧数为  $n(n-1)/2$ ,可生成树的总数为  $n^{n-2}$ ,可以用 1 到  $n$  的任意  $n-2$  个数的排列(Prüfer 数<sup>[23]</sup>)唯一表示。由树到 Prüfer 数的编码方式如下:

- 1) 找出树  $T$  上编号最小的叶子结点  $i$ 。
- 2) 把与结点  $i$  相连的结点  $j$  作为第一个编码数字,编码按从左到右的顺序进行。
- 3) 删除结点  $i$  和结点  $i$  到  $j$  的边,得到少一树支的新树。
- 4) 重复以上 3 个步骤直到剩下一条边,便完成了对该树的编码,即  $n-2$  个 1 到  $n$  之间的数字的排列。

同理,由一组 Prüfer 数可以解码产生唯一树,其过程如下:

- 1)  $A$  是一组 Prüfer 数, $B$  是所有不包括在  $A$  的结点的集合,称为构造树的合格端点。
- 2) 从  $B$  中找出标号最小的合格端点  $i$ , $j$  为  $A$  的最左边的数字,将  $i$  到  $j$  的边加到树上。将结点  $i$  从  $B$  中删除,并将 Prüfer 数中最左边的  $j$  删除,若  $A$  的剩余排列数中不再出现  $j$ ,则  $j$  变为合格节点,加入到  $B$  中。
- 3) 重复第 2 步骤直到  $A$  中排列数为空。
- 4) 当  $A$  为空时, $B$  中刚好有两个合格端点  $r,s$ ,其中一结点已在形成的树上,最后将  $r$  到  $s$  的边加到树上,便解码完成得到的原始 Prüfer 数所表示的一棵  $n-1$  条边的树。

根据上述编码和解码规则可得图 1 和图 2 中树结构所对应的 Prüfer 数编码分别为  $\{5,10,11,12,11,21,20,23,22,2,30,29,28,27,26,25,5,4,3,2,1,18,19,20,7,8,14,15,16,17\}$ ,  $\{8,7,6,5,11,26,25,5,4,3,2,30,29,28,24,23,22,2,1,18,19,20,21,11,12,13,14,15,16,17\}$ 。读者可以验证上述编码和解码过程(此编码去除 0 节点)。这种编码方法与二进制编码方法相比,减少的基因位数为联络开关数(独立闭环总数),故越复杂的配电网越能体现出 Prüfer 数编码的优势。

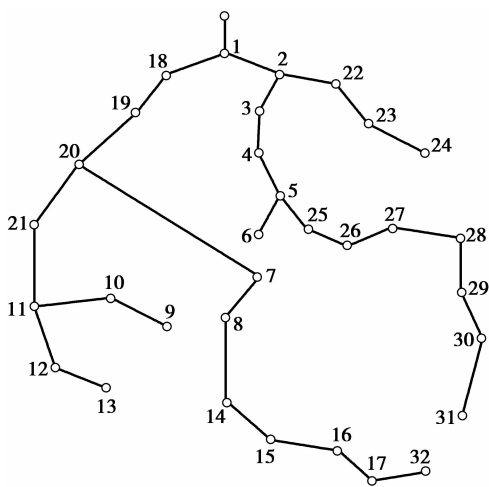


图 1 IEEE33 节点系统运行方式 1

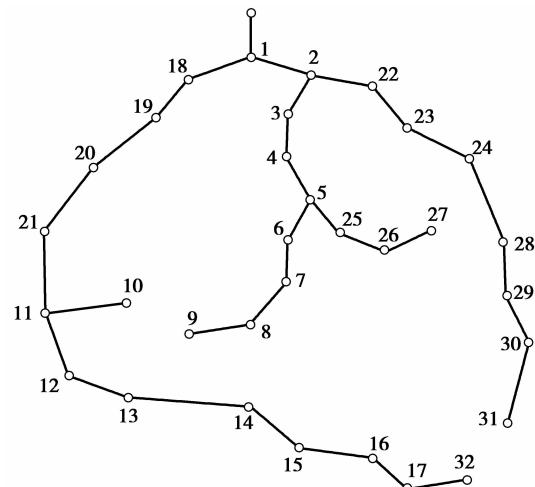


图 2 IEEE33 节点系统运行方式 2

根据本文的假设和研究方向,对于给定的某个配电网,由于自然环境、能源分布及电网稳定等方面的约束,规划中不可能所有的负荷节点都适合建设分布式电站,所以只对假设规划可建站接入电网的节点进行编码。

对于配电网闭环图中不在环中的节点不进行编码,如 IEEE33 系统中的 0 节点,综上所述染色体基因长度为配电网所有开关闭合时处在环中的节点数量和可建分布式电站的节点数之和再减 2。

## 2.3 选择、变异、交叉算子

为适应遗传算法的数学模型,将目标函数做如下处理变为适应度函数:

$$g(x) = f_{\max} - f(x). \quad (2)$$

对选择算子,按种群规模选择适应度最好的  $h(1 \sim 3)$  个个体不进行杂交而直接成为下一代,为防止这种保优方法使进化算法陷入这些最优个体基因的局部最优,已选择的保优个体不再参与选择操作。选择算子能保证适应度  $g_i$  越好的个体被选中参与杂交遗传的概率  $P_i$  越大,选择概率如式(3), $M$  是种群规模,即

$$P_i = g_i / \sum_{j=1}^{M-h} g_j. \quad (3)$$

杂交即将父代个体以概率  $P_c$  (取值范围为  $[0.40 \sim 0.99]$ ) 互换部分基因形成两个新个体。本文交叉算子采用适合处理组合优化问题的一致交叉(均匀交叉)。通过屏蔽字来实现基因段一致交叉:根据交叉概率产生一个和基因位数相同的 0、1 字符串,1 的个数表示进行交叉的基因位数,其数值跟据进化代数和群体适应度情况在迭代过程中适当选取,只有当基因位屏蔽字为 1 时,父代个体互换该位基因。

变异是为了保证算法不陷入局部最优而对杂交产生的新个体,以概率  $P_m$  (取值范围为  $[0.001 \sim 0.1]$ ) 随机改变某少部分基因位上的基因。为保证变异操作不易产生非法解,根据 Prüfer 数编码的特点,对变异可采用如下 3 种改进算子,算法实现中以等概率形式选择。

- 1) 插入操作:任意选取一个基因位,将其移动到另一个同样是随机选取的基因位之后。
- 2) 变换操作:任意选取两个基因位,互换其基因值。
- 3) 逆向操作:任意选取一小段基因,将其值反置。

为适应算法在进化的不同阶段种群整体适应度的变化,维持合理的收敛速度和逃离局部最优的能力,算子参数采用适应能力随进化代数而变化的交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$ ,其取值如式(4)、式(5) ( $t$  为进化代数,  $K$  为最大迭代次数):

$$P_c = 0.6 - 0.2 \frac{t}{K}, \quad (4)$$

$$P_m = 0.1 - 0.08 \frac{t}{K}. \quad (5)$$

## 2.4 非法解修复

非法解修复可分以下 3 个步骤进行。

1) 配电网的闭环结构并不是理想的完全图,因此,1 到  $n$  之间任意  $n-2$  个数字的排列,就肯定存在非法解(包含实际不存在的支路),如标准 IEEE33 节点系统为不完全图,可生成的树结构为 50 751 种,然而 33 个节点的完全图生成树总数为  $33^{31}$  棵,两者之差即为非法解数量,占用大部分空间<sup>[24-25]</sup>。Prüfer 数编码的优势之一就是其有一种简单的判断非法解方法:在 Prüfer 数排列中带有端点的度的信息,在与编码一一对应的树中中度为  $k$  的端点编码中刚好出现  $k-1$  次,而图和其生成树中结点的度只有少数几个不同。故首先进行度检查,用还没有达到度约束值的节点把不合格的节点以等概率方式替换掉。

2) 标准 IEEE33 节点系统闭环结构如图 3 所示。根据 Prüfer 数编码、解码总是从最小标号开始的原则,如果一个所有节点度都为 2 的简单支路的各节点为自然数依次编号时,那么当此支路有一个节点成为叶子结点,其他节点的 Prüfer 数编码基因段就唯一确定。例如 17 和 32 节点间支路断开,则  $(16, 15, 14)$ ,  $(28, 29, 30, 31)$  便为唯一确定的编码顺序;如 27 和 28 间的支路断开,那么  $(26, 25, 5)$  为唯一确定的编码段。如果简单支路节点没有产生叶子结点则该简单支路对应的基因编码段唯有两种可能,如 2 和 28 支路无断开点,则  $(23, 24, 28)$  或  $(23, 22, 2)$  为两种可能的基因段。Prüfer 数编码又一特点就是在树中所有叶子结点都不出现在排列中,再按这一特点进一步对非法解做简单的调整修复。

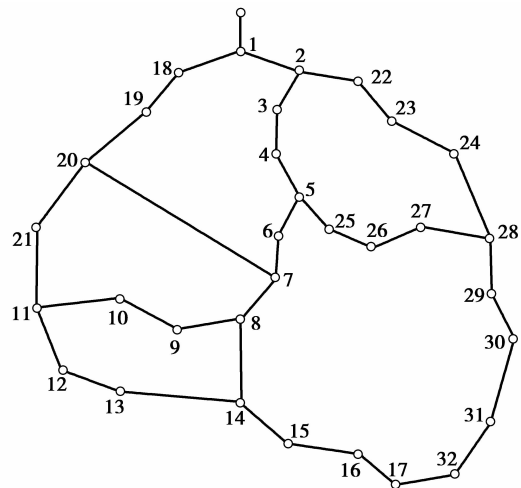


图 3 IEEE33 节点系统闭环结构

3) 经过度检查修复和确定基因段修复之后非法支路数

已经很少,Prüfer 数解码后得到的一定是树型结构图,所以可通过初级树变换方式完成最终修复:初级树变换是用一条新支路  $c_j \in G \setminus T$  替换树  $T_1 \subset G$  中的一条旧支路  $c_i$  形成树  $T_2 \subset G$ ,可替换的新支路是一个集合(基本割集)。  $T_1, T_2$  是图  $G$  的生成树,定义  $d(T_1, T_2) = k$  为  $T_1, T_2$  的距离,其值为属于树  $T_1$  但不属于树  $T_2$  的支路总数,根据图论  $T_1$  可以经过  $k$  次初级树变换得到  $T_2$ 。所以最后一步修复是将剩下的少数非法支路用相对应的基本割集中合法的支路通过初级树变换随机替换掉,得到可行解。

### 3 算法流程

- 1) 随机生成初始种群  $P(0)$ , 并进行非法解检查修复。设置种群进化最大迭代次数  $K$ 。进化代数  $t$  置零。
- 2) 评价种群  $P(t)$  个体适应度, 新代种群个体数  $m$  置零。
- 3) 判断是否满足算法收敛条件, 如满足退出循环输出结果, 否则执行保优策略, 令  $m=h$ , 转第 4 步。
- 4) 利用选择算子从其他父代中选取两个个体按杂交算子产生两个新代个体。
- 5) 对 4 步中的两个新个体进行变异算子操作。
- 6) 4, 5 步产生的两个已经进行过可行解检查修复新个体成为下一代,  $m=m+2$ 。
- 7) 如果  $m < M$ , 转到第 4 步, 否则  $t=t+1$ , 返回第 2 步。

### 4 验证分析

采用标准 IEEE33 节点系统验证分析本文算法, 分布式电源注入功率一般不得超过配网容量的 20%<sup>[2-3]</sup>。假设通过可行性研究适合建分布式电站的节点有 10 个(6、9、11、14、16、20、24、26、29、31), 规划建设 3 到 5 个分布式电站; 这里只考虑恒功率的分布式电源以方便简化计算、验证算法, 如燃气轮机, 以 PQ 节点处理, 功率因数为 0.9; 假设每组分布式发电机的额定容量为 100 kV·A, 可建机组总数为 12 组。

由本文编码方法, 染色体基因位数为 40, 前 30 位为由配电网开环树结构的 Prüfer 数编码, 后 10 位为 10 个适合建站的节点对应的整数编码位, 由于各种因素限制, 分布式电源容量不可能太大, 计算中假设最大容量为 400 kV·A。0 表示不建电站, 2 表示建 200 kV·A 额定容量的电站, 3 表示建 300 kV·A 额定容量的电站<sup>[26]</sup>。潮流计算采用前推回代计算方法<sup>[27]</sup>。

算法中初始种群规模  $M=100$ , 保优数  $h=2$ , 最大进化代数设置为  $K=100$ , 目标函数中网损和电压质量的权重系数设置为  $\alpha=0.8, \beta=0.2$ 。表 1 为几种不同编码遗传算法优化结果的比较。

表 1 几种算法优化结果比较

编码方式	DG 并网方案	断开支路	网络损耗	最低电压
二进制矩阵编码 <sup>[28]</sup>	11-1, 16-3, 24-2, 29-4, 31-2	7-20, 8-9, 13-14, 27-28, 31-32	77.103	0.960 8
开关号十进制编码 <sup>[22]</sup>	9-1, 16-2, 24-4, 29-3, 31-2	6-7, 9-10, 13-14, 17-32, 27-28	76.132	0.960 0
本文编码	11-1, 14-2, 16-2, 29-3, 31-4	6-7, 8-9, 13-14, 24-28, 31-32	74.890	0.964 5

说明: 并网方案中前面数字表示接入节点, 后面数字表示接入容量。

表 2 是与其他编码的遗传算法进化稳定时的代数比较, 图 4 是迭代过程中目标函数的收敛曲线。结果表明以节点号进行 Prüfer 数编码的遗传算法由于不可行解容易修复使行计算速度得以提高, 搜索空间的缩小和改进的遗传算子使收敛速度快, 进化代数少, 并能搜索到最优的解。因此, 本文算法能够为分布式电源选址定容问题提供更加优良的候选方案。

表 2 几种算法进化迭代次数比较

算法	平均进化代数
二进制矩阵编码遗传算法	70
开关号十进制编码遗传算法	55
Prüfer 数编码遗传算法	30

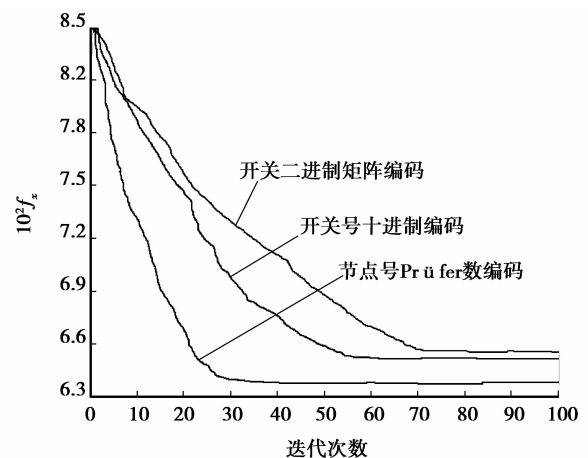


图 4 算法收敛速度比较

## 5 结 论

1)Prüfer 数编码的染色体基因位比开关二进制编码长度短,染色体基因相同段清晰明了,对交叉、变异操作的禁忌原则容易控制非法解的产生和修复,保证算法始终在可行解空间内搜索,充分结合并有效利用遗传算法的优势,提高了其计算和收敛速度。

2)笔者提出的编码方法在很好地完成了分布式电源的优化规划的同时综合解决了配电网结构的优化问题。算法完善了以往文献中遗传算法由于编码方式的局限性只从单方面进行寻优,从而只得到固定条件下的局部最优方案的不足,本文方法可搜索到全局最优方案。

### 参考文献:

- [ 1 ] Mahmoud K, Abdel-Akher M, Ahmen A A. Sizing and locating distributed generations for losses minimization and voltage stability improvement [C] // Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, November 29-December 1, 2010, Kuala, Lumpur. Piscataway: IEEE Press, 2010: 600-604.
- [ 2 ] 周涑,张冠军,李剑,等. 基于化整为零策略和改进二进制差分进化算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 197-203.  
ZHOU Quan, ZHANG Guanjun, LI Jian, et al. Distribution network reconfiguration based on strategy of breaking up the whole into parts and improved binary differential evolution algorithm [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 197-203.
- [ 3 ] 王守相,王慧,蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 110-114.  
WANG Shouxiang, WANG Hui, CAI Shengxia. Research summary of distributed generation optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 110-114.
- [ 4 ] 刘自发,张建华. 基于改进多组织粒子群体优化算法的配电网变电站选址定容[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 105-111.  
LIU Zifa, ZHANG Jianhua. Optimal planning of substation locating and sizing based on refined multi-team PSO algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 105-111.
- [ 5 ] 刘波,张焰,杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.  
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [ 6 ] 赵晶晶,李新,彭怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J], 电网技术, 2009, 33(17): 162-166.  
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization [J]. Power System Technology, 2009, 33, (17): 162-166.
- [ 7 ] 张节潭,程浩忠,姚良忠,等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.  
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [ 8 ] 王成山,陈恺,谢莹华,等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.  
WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [ 9 ] Wang D T C, Ochoa L F, Harrison G P. Modified GA and data envelopment analysis for multistage distribution network expansion planning under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 897-904.
- [ 10 ] 王建勋,刘会金,陈兴. 应用自适应微分进化算法的配电网综合优化[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 168-173.  
WANG Jianxun, LIU Huijin, CHEN Xing. An adaptive differential evolution algorithm for comprehensive optimization of distribution network [J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 168-173.
- [ 11 ] 夏澍,周明,李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.  
XIA Shu, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimization algorithm for distributed generation locating and sizing [J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 115-121.
- [ 12 ] 刘健,毕鹏翔,杨文宇,等. 配电网理论及应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

- [13] Martins V F, Borges C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [14] Dorkhosh S S, Samet H. Procedure for optimal sizing and locating distributed generator according network losses and protection constraints [C] // Proceedings of 2012 CIRED Workshop Integration of Renewables into the Distribution Grid, May 29-30, 2012, Lisbon, Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [15] Cossi A M, Mantovani J R S. Integrated planning of electric power distribution networks [J]. IEEE Latin America Transactions, 2009, 7(2): 203-210.
- [16] Abu-Mouti F S, El-Hawary M E. Heuristic curve-fitted technique for distributed generation optimization in radial distribution feeder systems [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(2): 172-180.
- [17] Liu B, Yuan Z Q, Bao H L. Intelligent optimization algorithm for the locating and sizing of distributed generation planning [C] // Proceedings of 2010 China International Conference on Electricity Distribution, September 13-16, 2010, Nanjing, Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [18] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根. 基于改良策略的配电网重构遗传算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 49-54.  
LI Xiaoming, HUANG Yanhao, YIN Xianggen. A genetic algorithm based on improvement strategy for power distribution network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 49-54.
- [19] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [20] Najafi S, Hosseinian S H, Vahidnia A, et al. A framework for optimal planning in large distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 1019-1028.
- [21] Morton A B, Mareels I M Y. An Efficient brute-force solution to the network reconfiguration problem [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 996-1000.
- [22] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法 [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.
- [23] 孙惠泉. 图论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] Jabr R A, Pal B C. Ordinal optimizations approach for locating and sizing of distributed generation. [J]. Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(8): 713-723.
- [25] Ali N Z M, Musirin I, Khalidin Z, et al. Distributed generation sizing and placement using computational intelligence [C] // Proceedings of 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, June 6-7, 2012, Melaka, Malaysia, Piscataway: IEEE Press, 2012: 527-532.
- [26] 蔡丽霞. 含分布式电源的配电网规划研究 [D]. 济南: 山东大学.
- [27] 李新, 彭怡, 赵晶晶, 等. 分布式电源并网的潮流计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 78-87.  
LI Xin, PENG Yi, ZHAO Jingjing, et al. Power flow calculation of distribution network with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 78-87.
- [28] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.  
MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.

(编辑 张 苹)