

配电网中基于人工鱼群算法的分布式发电规划

杨文荣, 吴海燕, 李练兵, 王华君

(河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130)

摘要: 应用人工鱼群算法对配电网扩展规划中分布式发电的选址和定容进行了优化, 优化求解采用了两层人工鱼群算法的嵌套。外层对分布式发电的位置和容量进行优化, 并将优化过程中生成的分布式发电个体加到线路扩展规划中, 计及分布式发电对配电网潮流的影响进行内层线路扩展规划。针对人工鱼群算法后期收敛速度慢、所得解精确度不高的问题, 对基本人工鱼群算法进行了改进。通过对网架优化和分布式发电优化综合规划结果进行经济性评估以衡量个体方案的优劣, 具体算例验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 人工鱼群算法; 配电网扩展规划; 分布式发电; 选址和定容; 算法改进

Planning of distribution network with DG based on artificial fish swarm algorithm

YANG Wen-rong, WU Hai-yan, LI Lian-bing, WANG Hua-jun

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: An artificial fish swarm algorithm (AFSA) is developed to optimize the site and size of distributed generation (DG) in expansion planning of the distribution network. Double nested AFSA is used to solve the optimization problem. The site and size of DG is optimized in the external line, and the DG individuals generated in the process of optimization are involved in the expansion planning. By taking into account the influence of DG on the power flow of the distribution network, the internal AFSA method is applied to the expansion planning. In addition, this paper designs the improved artificial fish swarm algorithm because the original artificial fish's convergence is slow and solution precision is low in the later period of arithmetic operation. At last, the result of the integrated planning of DG and network is used to evaluate the economics of individual DG's site and size solution. Specific examples show that the proposed AFSA is feasible and effective.

Key words: artificial fish swarm algorithm; distribution network expansion planning; distribution generation; siting and sizing; algorithm improved

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0156-06

0 引言

分布式发电 (distributed generation, DG) 是指以分散的方式布置在用户附近, 直接接在配电网中向用户供电的小型发电装置 (发电功率通常在数 kW 至 50 MW 的小型模块), 具有模块化、效率高、建设周期短、系统可靠性高、低投资、低损耗、环境友好等特点^[1-5]。随着不可再生能源的逐渐衰竭以及各国对环境保护问题的重视, 分布式发电作为一种新型的发电和能源综合必将成为电力工业的发展方向之一。但是大量的 DG 的引入必然会对传统配电网的节点电压、支路电流、网络可靠性等带来影响且其影响程度与分布式发电的位置和容量密切相关。因此合理选择 DG 接入配电网中的位置和容量

成为研究的热点课题。

含 DG 的配电网扩展规划是以电网规划为出发点, 根据系统的负荷增长情况, 以成本最小为目标, 在满足各种约束条件下规划出由电网升级、增建线路和变电所以及合理安排 DG 的安装位置和容量所组成的最佳方案。国内外的学者对 DG 的选址和定容已经取得了一定的研究成果。文献[5]计及 DG 对配电网潮流和线路负载能力的影响, 采用支路交换的模拟退火算法对配电网网架进行扩展优化, 应用遗传算法对分布式发电的选址和定容进行了综合优化。文献[6]在已知 DG 容量和位置的情况下, 把 DG 当作负“负荷”, 采用并行 Tabu 算法对配电网扩展规划问题进行优化。文献[7]对 DG 出力不确定性, 采用蒙特卡洛模拟分布式发电的出力, 采用遗

传算法对含 DG 的配电网进行扩展规划。

本文采用两层嵌套的人工鱼群算法对计及 DG 的配电扩展规划问题进行了优化, 外循环对 DG 的位置和容量进行了优化。内层优化将外循环中每代 DG 个体加入到配电网线路中进行潮流计算, 并结合图论知识提出一种能自动保证方案可行的新解产生方法, 只对可行解区域进行搜索, 避免了对配电网网架辐射性检查过程, 提高了寻优速度。

1 含 DG 的配电网扩展规划数学建模

1.1 目标函数的确立及各分量的计算

本文采用配电网综合支出年费用最小作为优化目标函数, 建立包含 DG、配电线路投资、运行年费用和年节省购电费用的目标函数。

$$\min f = C_{DG} + C_L + C_{en} \quad (1)$$

其中: f 为综合支出年费用; C_{DG} 为 DG 年发电费用; C_L 为待建线路年建设投资费用及运行维护费用; C_{en} 为加入 DG 后配电网年节省购电费用。模型中各分量计算表达式如下:

$$\begin{cases} C_{DG} = T_{\max} \cdot \sum_{i=1}^m (\lambda_i \cdot S_{DGi} \cdot C_{DGi}) \\ C_L = \sum_{i=1}^l (\alpha_i \cdot C_{iL} \cdot x_i + C_e \cdot \tau_{i\max} \cdot \Delta P_{iL}) \\ C_{en} = T_{\max} \cdot (P_{\sum\text{新增}} - P_{\sum\text{DG}}) \cdot C_e = \\ T_{\max} \cdot \left(P_{\sum\text{新增}} - \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot S_{DGi} \right) \cdot C_e \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_{\max} 为 DG 年平均运行最大小时数 (h); λ_i 为第 i 台 DG 运行功率因数; S_{DGi} 为第 i 台 DG 容量 (MVA); C_{DGi} 为第 i 台 DG 的单位电量成本 (元/kWh); α_i 为包含第 i 条线路的投资回收率和折旧维修率系数; C_{iL} 为第 i 条线路固定投资费用 (万元); $x_i \in \{0,1\}$, $x_i = 1$ 表示选定该条线路, $x_i = 0$ 表示未选中该线路; C_e 为单位电价 (元/kWh); $\tau_{i\max}$ 为线路最大负荷利用小时数 (h); $\Delta P_{iL} = I_i^2 R$ 为线路 i 的有功损耗 (MW); $P_{\sum\text{DG}}$ 为接入 DG 有功功率总量 (MW); $P_{\sum\text{新增}}$ 为扩展规划新增负荷总量 (MW)。

1.2 约束条件

1) 容量约束

$$I_i \leq I_i^{\max} \quad (3)$$

式中: I_i 为支路电流; I_i^{\max} 为支路最大允许电流, $i=1, 2, 3, \dots, m$

2) 节点电压约束

$$U_j^{\min} < U_j < U_j^{\max} \quad (4)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, N$, U_j 为节点 j 的电压; U_j^{\max} 和 U_j^{\min} 分别为节点电压允许的最大值和最小值。

3) 分布式发电容量约束

$$P_{DGj} \leq P_{Lj}, P_{\sum\text{DG}} \leq P_{\max} \quad (5)$$

配电网在正常运行时呈辐射状单向潮流流动, 为了保证 DG 接入电网后不使潮流发生反向, 因此加入配电网单个 DG 安装容量 P_{DGj} 不大于安装节点负荷量 P_{Lj} 的约束条件。由于 DG 出力具有不确定性 (风力发电和光伏发电受风速和太阳光辐射强度等自然环境的影响), 接入 DG 比例过高将导致电能质量下降, 因此必须考虑 DG 接入总容量的限制。本文要求接入电网的 DG 最大容量 P_{\max} 为新增负荷总量的 20%。

4) 含 DG 的配电网潮流约束

对接入配电网的 DG 模型^[8]既可以简化为 PV 节点, 也可以简化为 PQ 节点。本文将 DG 视为具有恒定功率因数的 PQ 节点, 并计及 DG 对线路负载能力的影响^[5]假设 DG 接到除电源点外的负荷点上且一个负荷节点只能安装一个分布式发电。本文潮流计算运用基于支路电流的前推后代法^[9], 对含 DG 的配电网进行潮流计算。

5) 配电网辐射状约束

随机产生的配电网网架可行方案的比例相当低, 致使优化算法进化速度变得很慢, 而额外的辐射性检验子程序用来确定是否对不可行的方案进行惩罚或进行修复又增加了寻优时间。因此本文采用根节点融合法^[10]产生初始线路, 保证了人工鱼个体在初始迭代过程中都满足配电网严格辐射性的约束, 提高了寻优速度。在寻优过程中, 论文结合图论中支撑树^[11]的思想, 提出一种能自动保证辐射性网络的觅食行为, 确保进化过程中每个规划方案均拓扑可行, 只搜索可行解区域, 这样就大大提高了寻优效率。

在上述约束条件中, 论文设计的方案能自动满足 DG 容量约束和线路辐射性的约束, 潮流约束体现在潮流计算中, 不必显示表示。本文对支路电流约束和节点电压不等式约束采用罚函数的方式引入目标函数中, 进而得到新的目标函数如下

$$\min F = \min f + k_1 \sum_{i=1}^m [\max(|I_i| - I_i^{\max}, 0)] + k_2 \sum_{j=1}^N [\max(U_j - U_j^{\max}, 0) + \max(U_j^{\min} - U_j, 0)] \quad (6)$$

式 (6) 中, k_1, k_2 为惩罚系数, 为了有效剔除违背约束条件的个体, 惩罚系数一般取得很大 (本

文取 1000)。

6) 收敛条件

算法的终止条件可以根据实际情况设定, 通常的方法有判断连续多次所得值的均方差是否小于预期的误差, 或者直接规定迭代的次数。本文终止策略为达到最大迭代次数 (本文取 50)。

2 人工鱼群算法描述及求解策略

基于现代启发式全局搜索寻优策略的人工鱼群优化算法 (Artificial Fish Swarm Algorithm, AFSA) 由 M 条人工鱼组成的鱼群在 m 维搜索空间游弋觅食, 问题优化解用人工鱼个体向量 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 表示, 每条人工鱼代表一种规划方案, 人工鱼所处 \mathbf{X} 处的食物浓度即为目标函数值, 表示为 $Y=f(\mathbf{X})$ 。觅食行为为算法新解产生器, 从而能跳出局部极值邻域; 追尾行为加快了算法寻优速度, 避免陷入局部极值; 聚群行为能使寻优结果朝着全局极值移动。(由于篇幅所限人工鱼群算法中参数距离 $Dist$ 、邻域、视野 $Visual$ 、拥挤度 δ 、中心位置 \mathbf{X}_c 定义参见文献[12])。作为一种高效并行优化算法, AFSA 具有良好的克服局部极值、取得全局极值的能力并且对初值、参数选择不敏感、鲁棒性强、易实现等优点。目前 AFSA 已被引入到输电网扩展规划^[12-13], 组合优化问题中的 TSP^[14]的优化, 配电网网架优化^[15]及最优潮流计算^[16]并且取得了很好的效果。本文采用两层嵌套的人工鱼群算法对含 DG 的配电网进行扩展规划。图 1 为含分布式发电的配电网扩展规划求解流程。

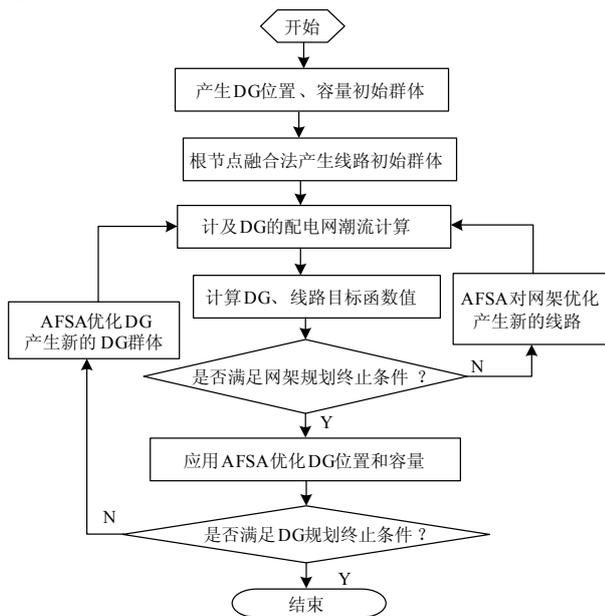


图 1 含 DG 的配电网扩展规划流程图

Fig.1 Flow chart of distribution network expansion planning

with DG

2.1 DG 编码和初始群体的产生

本文对分布式发电的位置和容量信息采用实数编码的方法。对于一个具有 N 个负荷节点辐射型配电网, 分布式发电的建设方案运用一组变量 $\mathbf{D}=\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 来表示。 d_i 的数值大小为对应的节点 i 安装 DG 的容量信息, 下标 i 为安装 DG 节点的位置信息。选用实数编码的方法避免了二进制的编码、译码等繁琐问题。计及 DG 容量约束条件确定分布式发电的初始群体流程如下:

1) 计算扩展规划配电网新增负荷总量, 由给定 DG 接入比例确定 DG 接入总量 $P_{\Sigma DG}$, 本文取 20%

$$P_{\Sigma DG} = P_{\Sigma \text{新增}} \times 20\% / \lambda \quad (7)$$

2) 根据接入负荷点的 DG 单位容量为 P_s 确定 DG 接入容量最大正整数编号

$$b_{\max} = \text{floor}\left(P_{\Sigma DG} / P_s\right) \quad (8)$$

(“floor” 为 matlab 取整函数) 则 DG 安装点集合为 $\{1, 2, 3, \dots, b_{\max}\}$ 。

3) 在 DG 安装点集合中随机取一个元素 p , 从而确定接入 DG 容量

$$J_s = p \cdot P_s \quad (9)$$

4) 找到待安装 DG 节点负荷值大于 J_s 的位置, 如果为空则返回步骤 3), 否则将 J_s 随机安装在小于负荷点上, 同时将节点矩阵中该负荷值赋为 0, 并将已选 DG 加入到 $Total$ 中。

5) 确定剩余待安装 DG 最大容量编号

$$J = \text{floor}\left((P_{\Sigma DG} - Total) / P_s\right) \quad (10)$$

如果 $J=0$ 则结束程序。否则将 J 赋给 b_{\max} 返回步骤 3)。

这样就产生一个分布式发电容量和位置的初始群体, 如果人工鱼群算法群体规模为 D_{size} 则重复上述步骤 (2~5) 共 D_{size} 次来生成优化 DG 方案的初始鱼群。

2.2 线路编码和初始群体的产生

本文对待选线路采用二进制编码策略, 将 DG 作为具有恒定功率因数的 PQ 节点加入到负荷节点中, 假定变电站容量能满足负荷增长的要求, 即仅对配电网网架进行规划。采用根节点融合法产生初始线路并对计及 DG 的配电网进行潮流计算, 如果潮流计算收敛则保留该条线路, 否则重新产生新的

辐射线路, 直到满足线路群体规模 P_{opsiz} 为止。

2.3 人工鱼群算法在计及 DG 的配电网扩展规划中的实现

人工鱼群算法按照寻找食物浓度较低进步最快的原则, 先进行追尾行为, 如果没有进步再进行觅食行为, 如果还没有进步则执行聚群行为, 如果依然没有进步就随机移动一步。设置一个公告板, 记录寻优过程中的每代最优人工鱼个体的状态。每迭代一次后, 检验各人工鱼状态和公告板的状态, 如果自身状态优于公告板状态, 就将公告板状态改写为自身状态。

2.4 扩展规划中觅食算子的实现

人工鱼在视野 (*Visual*) 内搜索低于当前位置食物浓度的位置, 一旦发现则向该位置移动一步, 若达最大尝试搜索次数还未发现, 则随机游动一步。人工鱼的视野即为所能改变当前线路的最大条数。觅食行为为鱼群算法新解产生器, 在视野内随机产生的新解往往不满足配电网拓扑的可行性, 大大降低了进化速度, 甚至会停滞不前。本文采用支撑树^[11]的思想, 保证在寻优过程中产生新解 X_j 拓扑满足辐射性的要求。当前辐射型线路 X_i 在图论中可视为一棵支撑树。以 X_i 的电源点作为根节点, 基于广度优先搜索的思想, 由根节点出发遍历所有节点和支路形成邻接矩阵记为 L 。 L 中元素由 0、1 组成。若 L_{ij} 为 1, 表示节点 i 与 j 之间有支路相连, 其方向从 i 指向 j , 记为 $i \rightarrow j$ 。否则, 节点 i 与 j 之间不存在支路。删除 L 中支路 $i \rightarrow k$, 增加支路 $j \rightarrow k$ 得到新的有向图 L^* 。当且仅当节点 k 到 j 不存在有向路径, 则得到支撑树 L^* , 对矩阵 L^* 进行解码则得到对应产生新的辐射性线路 X_j 。

2.5 人工鱼群算法在 DG 选址和定容中的实现

AFSA 采用进步最快的原则对 DG 选址和定容优化。觅食行为优化过程中, 视野内随机产生的新解往往不满足 DG 容量的约束, 这样就使得算法效率降低, 甚至停滞不前。本文根据 DG 容量限制对随机产生的 DG 个体进行修复。设计 DG 新解流程如下:

1) 从当前 DG 的状态 D_i 中随机选择 DG_{vis} 位, 在 DG 待选容量集合内随机找到 DG_{vis} 个元素, 对应更新 D_i 选定位置容量, 满足 D_i 各位容量不大于各节点负荷容量。

2) 当 D_i 总容量大于所需总容量时, 从 D_i 选定的 DG_{vis} 位内随机去掉某个负荷节点上的分布式发电, 直到总容量不大于所需总容量。若小于则执行步骤 3); 若等于则执行步骤 4)。

3) D_i 总容量小于所需总容量时, 按以下 2 种

情况处理: 当两者之差绝对值大于或等于最大待选容量时, 从所有待选分布式发电集合中随机选取一个元素; 而小于最大待选容量时, 从待选容量集合总随机选择一个小于容量差绝对值的元素。然后随机安装在 DG_{vis} 位上, 并且小于单个负荷节点容量, 直到容量差绝对值小于最小待选容量或刚好满足接入比例约束。

4) 将更新后分布式发电容量 D_j 加入线路负荷节点进行潮流计算, 若收敛则结束, 否则返回步骤 1 重新产生 D_j 。

2.6 人工鱼群算法的改进

基本鱼群算法前期收敛快后期收敛速度减慢, 其中有大量的计算时间浪费在随机的移动之中。与连续性优化问题不同, AFSA 在处理一般中小规模配电网规划问题效果并不明显, 而觅食行为最活跃^[13]。视野范围较小时, 觅食行为和随机移动的行为表现得较为突出; 视野范围较大时, 追尾和聚群行为表现得较为突出。针对此缺陷和中压配电网网架规划的特点论文提出了视野动态调整策略。按如下公式对视野 (*Visual*) 进行动态调整

$$Visual = \text{round}(Visual_0 - Visual_0 \cdot \text{iter}/\text{gen_max}) \quad (11)$$

式中: $Visual_0$ 为视野初值; iter 为迭代次数; gen_max 为最大迭代次数; round 为 Matlab 语言中的取整函数。由式 (11) 可知, 在算法前期使视野保持较大的范围, 可以增强算法的全局搜索能力; 随着迭代次数的增加, 视野逐渐减小, 觅食行为和随机移动行为增强, 有利于局部搜索、提高搜索精度。AFSA 具有把握搜索方向和在一定程度上避免陷入局部最优的特性, 但当一部分人工鱼处于漫无目的地随机移动或人工鱼群在非全局极值点出现较严重拥挤情况时, 收敛速度将大大减慢, 使得搜索精度也大大降低。为了克服此缺点, 本文引入了类似遗传算法中选择算子最优个体保留策略^[17]的鱼群算法, 即从上一代中直接拷贝最优解至下一代的过程, 防止群体中最优个体的退化。最优个体保留策略是保证群体收敛到优化问题最优解的一种基本保障, 加快了算法收敛速度, 提高了算法效率。

3 算例分析

某 10 kV 中压配电网^[18] (如图 2 所示) 具有 10 个节点、2 条已有支路和 14 条可扩建支路。图中实线为已有线路, 虚线为待选线路, 节点 0 为电源节点, 其余均为负荷节点, 其中节点 2, 4-9 为新增负荷节点。

假设网络中节点 1-9 允许接入分布式发电。待选单个分布式发电功率因数为 $\lambda = 0.9$, 容量为 P_s 。

($P_s=0.1$ MVA) 的整数倍, 且不大于安装节点的负荷量。本文分布式发电最大接入容量为新增负荷总量的 20%, 即分布式发电的装机容量不超过新增负荷总量的 20%, 新增负荷总有功功率为 $P_{\Sigma\text{新增}}=5.7$ MW, 由式 (7) 知分布式发电在电网中的最大接入容量为 1.27 MVA; 由式 (8) 可以计算出接入 DG 的最大容量编号为 12。

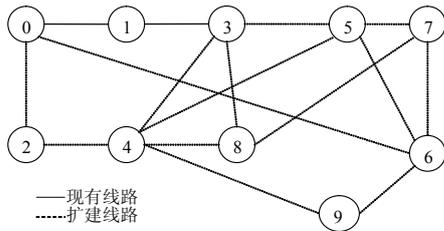


图 2 系统初始网架

Fig.2 Initial network of system

论文对所编 AFSA 程序参数进行了反复试验, 发现人工鱼的数目对算法计算时间影响最大, 因此在满足算法收敛的前提下合理选择人工鱼的数目是提高算法效率的关键。配电网扩展规划中 AFSA 各参数如下: $P_{\text{opsize}}=10$, $T_{\text{rynum}}=10$, $V_{\text{isual}}=5$, $\delta=0.8$, $m=16$, $C_{1r}=0.155$, $C_{2r}=0.5$, $T_{\text{max}}=3000$, $gen_max=50$; 应用 AFSA 优化 DG 位置和容量各参数为: $D_{\text{size}}=10$, $D_{\text{gen}}=10$, $D_{\text{try}}=10$, $D_{\text{vis}}=3$, $D_{\text{del}}=0.9$ 。

含 DG 和不含 DG 的配电网网架优化拓扑图如图 3、4 所示。

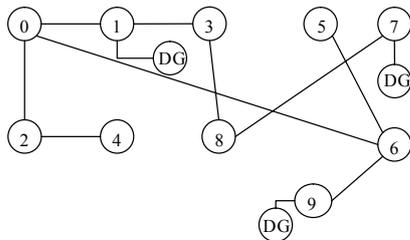


图 3 含 DG 配电网网架优化拓扑图

Fig.3 Optimization topology of distribution network with DG

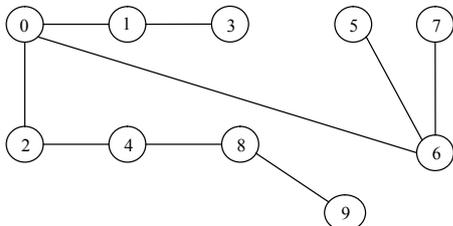


图 4 不含 DG 配电网网架优化拓扑图

Fig.4 Optimization topology of distribution network without DG

由表 1 可知, DG 引入使配电网网架投资成本和线路损耗均低于不含 DG 的情况, 网损费用减少了近 60%, 年购电费用减少了近 20%。含分布式发

电的方案年费用为 872.661 万元, 不含分布式发电的方案年费用为 886.739 万元, 可见引入 DG 后能明显带来经济效益。

表 1 配电网扩展规划成本比较

Tab.1 Comparison of the cost of distribution network expansion planning

方案名	万元	
	含 DG	不含 DG
线路年费用	15.097	17.624
网损年费用	5.364	14.115
购电年费用	693	855
DG 年费用	159.2	0
总年费用	872.661	886.739

4 结论

本文采用一种新型的人工智能算法人工鱼群算法对含 DG 的配电网进行扩展规划, 对配电网扩展规划优化中提出一种能自动满足线路辐射性的设计方案, 并对鱼群算法后期存在收敛速度慢、易陷入局部极值问题进行了改进。通过具体算例验证了鱼群算法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Dugan R C, Mc Dermott T E, Ball G J. Planning for distributed generation[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7 (2): 80-88.
- [2] Carpinelli G, Celli G, Pilo F, et al. Distributed generation siting and sizing under uncertainty[C]. //Proc of Power Tech'2001 Conference. Porto (Portugal): 2001: 376-401.
- [3] Ng C H, Lie T T, Goel L. Impacts of distributed generation on system reliability in competitive electricity markets[J]. Power Engineering Conference. Singapore: 2007: 735-740.
- [4] Kuri B, Li F. Distributed generation planning in the deregulated electricity supply industry[C]. //Power Engineering Society General Meeting, IEEE. Denver: 2004: 2085-2089.
- [5] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式发电的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (3): 38-43.
WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems. 2006, 30 (3): 38-43.
- [6] Mori H, Iimura Y. Application of parallel tabu search to distribution network expansion planning with distributed generation[C]. //2003 IEEE Power Tech Conference Proceedings. 2003: 580-587.
- [7] 高军彦. 计及分布式发电的配电网扩展规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.

- GAO Jun-yan. Distribution network expansion planning including distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [8] DELFINOB. Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago (IL, USA): 2002: 170-175.
- [9] 张明, 毕鹏翔, 刘健, 等. 辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 41-44.
ZHANG Ming, BI Peng-xiang, LIU Jian, et al. Research on emergency of branch current method based on power flow calculation for radial distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 41-44.
- [10] 刘晓飞, 彭建春, 高效, 等. 基于单亲遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2002, 26 (3): 52-56.
LIU Xiao-fei, PENG Jian-chun, GAO Xiao, et al. Distribution network planning based on partheno-genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26 (3): 52-56.
- [11] 欧阳武. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [12] 吕盼. 基于离散人工鱼群算法的输电网优化规划研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2009.
Lü Pan. Transmission network planning based on discrete artificial fish school algorithm[D]. Jinlin: Northeast Dianli University, 2009.
- [13] 聂宏展, 乔怡, 吕盼, 等. 基于混合人工鱼群算法的输电网扩展规划[J]. 电网技术, 2009, 33 (2): 78-83.
NIE Hong-zhan, QIAO Yi, Lü Pan, et al. Transmission network expansion planning based on hybrid artificial fish school algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33 (2): 78-83.
- [14] 李晓磊, 路飞, 田国会, 等. 组合优化问题的人工鱼群算法应用[J]. 山东大学学报, 2004, 34 (5): 64-67.
LI Xiao-lei, LU Fei, TIAN Guo-hui, et al. Applications of artificial fish school algorithm in combinatorial optimization problems[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2004, 34 (5): 64-67.
- [15] 程晓荣, 张秋亮, 王智慧, 等. 基于人工鱼群算法的配电网网架优化规划[J]. 继电器, 2007, 35 (21): 34-38.
CHENG Xiao-rong, ZHANG Qiu-liang, WANG Zhi-hui, et al. Distribution network structure planning based on AFSA[J]. Relay, 2007, 35 (21): 34-38.
- [16] 刘耀年, 李迎红, 张冰冰, 等. 基于人工鱼群算法的最优潮流计算[J]. 电工电能新技术, 2006, 25 (10): 30-34.
LIU Yao-nian, LI Ying-hong, ZHANG Bing-bing, et al. Artificial fish school algorithm for optimal power flow problems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25 (10): 30-34.
- [17] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Principle and application of genetic algorithms[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [18] 康庆平, 周雷. 一个实用的配电网优化规划方法[J]. 电网技术, 1994, 18 (6): 39-43.
KANG Qing-ping, ZHOU Lei. An efficient method of optimum planning for distribution systems[J]. Power System Technology, 1994, 18 (6): 39-43.

收稿日期: 2010-04-15

作者简介:

杨文荣 (1969-), 女, 博士, 教授, 主要研究领域为工程电磁场与磁技术, 电力电子及其应用;

吴海燕 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为智能电网与分布式发电系统;

李练兵 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为风电逆变器、光伏并网逆变器、运动控制。E-mail: lilianbing@hebut.edu.cn

(上接第 155 页 continued from page 155)

- FENG Zhi-hong, LIU Qu, ZHOU Shuang-xi, et al. An eigen-structure analysis method of the steady-state voltage stability in multimachine system[J]. Journal of Tsinghua University, 1991, 3 (4): 19-27.
- [7] Berrizzi A, Finazzi P, Dosi D, et al. First and second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1998, 13 (2): 543-551.
- [8] 姜勇, 周双喜, 朱凌志. 电力系统电压稳定分析中的二阶指标[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42 (9): 1165-1167.
JIANG Yong, ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi. Second-order indices for power systems steady state voltage stability[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42 (9): 1165-1167.
- [9] Wandell B A. Foundations of vision, sinauer associates[M]. P underland, MA: Inc. Sublshers, 1995.

收稿日期: 2009-11-24; 修回日期: 2010-01-05

作者简介:

干磊 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电压稳定分析, 分布式发电, 电能质量治理; E-mail: ganlei9199@163.com

康河文 (1983-), 男, 助理工程师, 本科, 研究方向为电气工程及其自动化;

何敏 (1985-), 女, 本科, 研究方向为电压稳定分析, 分布式发电, 电能质量治理。