基于蚁群最优的配电网网架规划方法

胡 斌, 顾 洁, 王衍东
(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 配电网规划问题是一个复杂的组合优化问题。蚁群算法是用于解决组合优化问题的一种高效的随机化内启发式全局搜索技术,能有效地求解大规模组合优化问题。文中结合单阶段配电网规划问题的特点,应用蚁群算法来解决配电网规划问题,建立了相应的数学模型,并给出求解算法。算例的计算结果表明了这种方法是可行、有效的。

关键词: 配电网络; 蚁群最优; 现代启发式方法

中图分类号: TM715 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)21-0054-04

0 引言

配电网规划[1]是一个非常复杂的大规模组合优化问题,涉及变电站和馈线段的建设和容量大小的最优选择,以满足负荷增长的要求,同时服从变电站容量、馈线段容量、电压降落、辐射状网络结构等约束,具有时变性、离散性、非线性及随机性,求解相当复杂。传统的数学规划方法能够从理论上保证规划方案的最优性,但当网络规模增大时,就很难求解此类复杂的组合优化问题。近年来,从自然现象中发现并总结出的许多启发式方法(如遗传算法 GAs[2]、Tabu[3]搜索法等),逐步开始应用于电网规划,已被证明是非常有效的。

蚁群算法 ACA(Ant Colony Algorithm)主要是模仿蚂蚁觅食机理,通过一定数量人工蚂蚁相互通信、协作,迅速寻找到最优路径。ACA是一种求解组合最优问题的通用新型内启发式方法,该算法通过多个代理(人工蚂蚁)间的信息交互完成整个蚁群的复杂行为,通过正反馈来加速最优解的搜索过程,通过分布计算来避免过早陷入局部最优解。

针对配电网的辐射型特点,本文在利用蚁群算法进行优化求解过程中,提出一种新的解的表示方法,即以图论中的支撑树来表示问题的解,该方法避免了配电网的辐射型检查,使得算法的搜索域限定在可行解域,从而大大改善蚁群算法的搜索效率。

1 配电网络规划的数学模型

配电网络规划是在规划水平年负荷预测已知的条件下,确定满足运行要求的最经济的网络方案。其中,运行要求指的是满足基态运行约束(过负荷约束、电压降落约束、辐射状网络以及可靠性等约束)。经济性目标通常为网络的建设费用和运行及损耗费用。作为初步研究,且为了与其它文献中的结果相比较,这里只考虑基态运行方式下的过负荷约束和辐射状网络约束,以线路的年综合费用和过负荷惩罚费用之和最小为目标函数。

配电网最优规划问题数学模型:

$$\min f(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} (C_{1i} X_i + C_{2i} T_{\max i} \Delta P_i) + A_1 L \\ A_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X为 n维决策矢量,代表问题的解; x_i是矢量 X的元素,当待选线路 I被选中时 $x_i = 1$,否则 $x_i = 2$; $C_{1i} = \gamma_i + \alpha_i$, γ_i是投资回收率, α_i是设备折旧维修率; C_{2i}是电价(元/kW·h); ΔP_i是线路 I的有功损耗(kW); $T_{\max i}$是相应的年最大损耗时间(h); A_1是过负荷惩罚系数; L是网络的过负荷(即超过线路最大允许负荷)的部分,其数值可以通过网络的负荷潮流求得; A_2是一个大数,代表网络为非辐射网时的惩罚值,本文中通过对过负荷约束和辐射状约束不能满足的方案的目标函数值取定为一个较大的正数,例如 1.0e+10等,来保证方案的技术可行性。

2 ACA基本过程[4~8]

起初是将规划区内 n条可行待选线路从 1到 n编号;然后求出每条待选线路的荷尔蒙强度,根据路径上的荷尔蒙强度选择前方路径,并调整所选路径上的荷尔蒙强度。具体过程为:

1)初始化算法参数。定义一组人工蚂蚁,初始

基金项目: 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

化各待选线路上的荷尔蒙强度,每个元素的初始荷尔蒙强度是相同的,寻优过程中,其荷尔蒙强度随着蚁群运动而改变。

2)确定转移概率,选择前进路径。

合理的状态转移准则既要以一定的概率保留现有最优解,又要以一定的概率搜索新的可行解。

取 q是一个区间在 $[0, 1]$上均匀分布的随机变量, q_0 是一常数, $0 \leq q_0 \leq 1$;随机产生变量 q。

若 $q \leq q_0$,则

$$\rho_j(i, k_0) = \begin{cases} 1 & k_0 \in L_j(i) \text{且 } P_j(i, k_0) = \max\limits_{k \in L_j(i)} (P_j(i, k)) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{2}$$

否则

$$\rho_j(i, k) = \begin{cases} \dfrac{P_j(i, k)}{\sum\limits_{k \in L_j(i)} P_j(i, k)} & \text{如 } k \in L_j(i) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{3}$$

其中:$\rho_j(i, k)$表示蚂蚁 j在第 i步选择前进路径 k的转移概率; $P_j(i, k)$表示蚂蚁 j第 i步选择前进路径时路径 k上的荷尔蒙强度; $L_j(i)$代表蚂蚁 j第 i步所能选择的所有前进路径。

3)评价蚂蚁游程,记录当前最优解,进行荷尔蒙强度的局部更新。

每当一只人工蚂蚁完成一次搜索时,进行荷尔蒙强度的局部更新。如果路径 (i, k)是蚂蚁 j所选择的前进路径之一,则按式 (4)调整其相应的荷尔蒙强度;否则,不作调整。

$$P_j(i, k) \leftarrow (1 - a_0) \cdot P_j(i, k) + a_0 \cdot \Delta P_j(i, k) \tag{4}$$

其中:$0 < a_0 < 1$为常数, $(1 - a_0) P_j(i, k)$代表荷尔蒙的挥发。$\Delta P_j(i, k)$根据不同的情况有许多种选取方法。局部更新是为避免后来的蚂蚁只在当前所走过的优化路径附近寻路。

4) 荷尔蒙强度的全局更新。

全局更新准则为:所有人工蚂蚁均完成一次检索时,对于当前最优方案上的路径,按式 (5)进行荷尔蒙强度全局更新。

$$P_j(i, k) \leftarrow (1 - a_1) \cdot P_j(i, k) + a_1 \cdot \Delta P_j(i, k) \tag{5}$$

对于其它路径,按式 (6)进行荷尔蒙强度全局更新。

$$P_j(i, k) \leftarrow (1 - a_1) \cdot P_j(i, k) \tag{6}$$

其中:$0 < a_1 < 1$为常数, $(1 - a_1) \cdot P_j(i, k)$代表荷尔蒙的挥发。$\Delta P_j(i, k)$根据不同的情况有许多种选取方法。

全局更新的目的在于使搜索向着最优的方向前进,能加速收敛。

5) 重复步骤 2) ～4),直到满足给定的迭代终止条件。

3　ACA用于求解配电网规划[9～11]

在迭代过程中,为了避免出现大量不可行解(主要是非辐射状网络解),提高整个搜索过程的效率,减少计算时间,应尽可能地将规划过程中产生的每一个试验解限制为辐射状网络解,本文通过对蚁群算法进行以下改进操作,实现了搜索效率的提高。

$M_j(j, k)$为第 j只蚂蚁第 k步连入树的节点集合; $N_j(j, k)$为第 j只蚂蚁第 k步未连入树的节点集合; $W_j(j, k)$为第 k步时在两节点间所有待建边的集合。每一次游程中,蚂蚁 j在第 k步时先以概率 $\rho_j(i, k)$从集合 $W_j(j, k)$选择边 m,然后更新两节点集合,令 $N_j(j, k+1) = N_j(j, k) - \{u\}$, $M_j(j, k+1) = M_j(j, k) + \{u\}$。其中,节点 u是边 m的一个端点,且 $u \in N_j(j, k)$。最后更新集合 $W_j(j, k)$,同时,新连入树的节点 u与集合 $U_j(j, k+1)$之间的可选边组成了集合 $Z_j(j, k+1)$,应并入集合 $W_j(j, k)$,这就确保了每个解都有可能被生成。重复执行上述过程,直到所有的负荷节点都被连入树。

根据式 (1)所描述的配电网络规划的数学模型,规划方案的每一个可能解都是 n个节点(包括变电站和负荷节点)间线路的各种可能组合的一个子集。各线路的选择应尽可能地减小式 (1)中目标函数的值。按文中提出的 ACA的工作原理,对 n个节点从 1～n进行编号,整个网络规划分为 n步完成,每一步确定一条待选线路。每只人工蚂蚁在第 i步从待选线路中选定一条线路,选择哪条线路由状态转移准则决定。每只蚂蚁经过 n步之后形成一个线路集,该线路集构成一个规划方案。每只蚂蚁完成一次规划方案后都按式 (2)进行一次荷尔蒙强度的局部更新,其中 $\Delta P_j(i, k)$的选取规则为: $\Delta P_j(i, k) = C_0 / f_j(z)$,其中 C_0为一常数, $f_j(z)$为第 j只蚂蚁选择的规划方案按式 (1)所得的目标函数值。这样,目标函数值越好的扩建方案,其后被后来的蚂蚁选择的可能性就越大,所以通过式 (2)进行荷尔蒙强度的局部更新,既可避免陷入局部解,还可使方案选择向更经济的方向进行。所有蚂蚁均完成一次规划方案后,按式 (5)、(6)进行一次荷尔蒙强度的全

局更新,其中 $\Delta p_j(i,k)$的选取规则为:$\Delta p_j(i,k)=C_1/f_0(Z)$,其中 C_1为一常数,$f_0(z)$为当前最优方案的目标函数。按前述过程不断进行搜索,直到满足给定的终止条件。

ACA与其它现代启发式算法相比,有一个显著优点,即 ACA不需要初始可行解,当网络规模较大时,初始可行解的寻求可能比较麻烦。GAs需要一定数量的初始可行解,增加了初始工作量和难度;而 Tabu搜索通常将所有待选线路均加入网络中,形成初始可行解。初始可行解的选取会影响 GAs和 Tabu搜索的解算速度,而 ACA不存在这样的问题。

配电网规划的 ACA算法的整个过程如图 1所示。

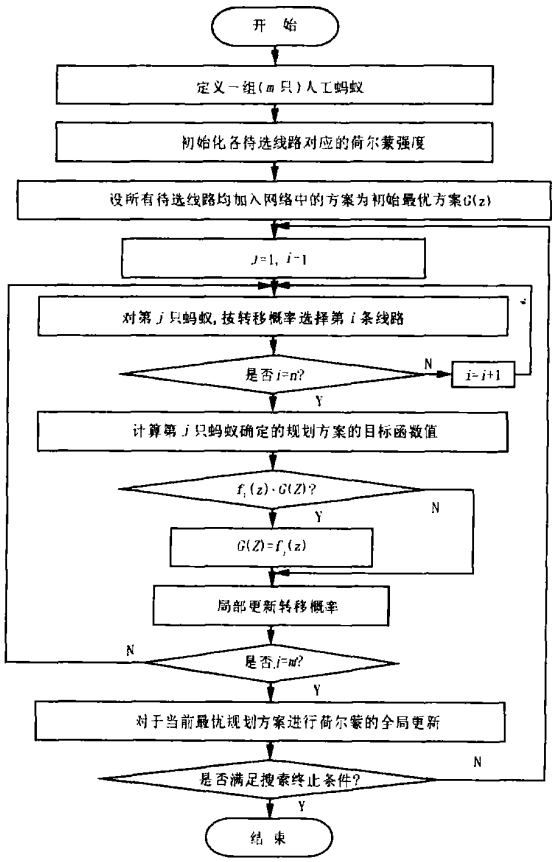

图 1 算法流程图

Fig 1 Flow chart of the algorithm

4 算例

文中引用文献[7]中的算例对基于蚁群算法的配电网网架优化规划方法进行验证。算例为一个具有 10节点、2条现有支路和 14条可扩建支路的 10 kV配电网扩张规划,算例中的 ACA有关参数设置为:$q=0.5$, $a_0=a_1=0.15$, $m=30$, $C_0=3\,000$, $C_1=4\,000$。优化结果与文献[7]相同。

算例 2以某地区 10 kV配电网规划为例。该地区各地块划分如图 2所示,根据地块功能块划分确定负荷节点 22个,各负荷节点负荷需求如表 1所示。规划区内 35 kV变电站一座(3×31.5 MVA)。

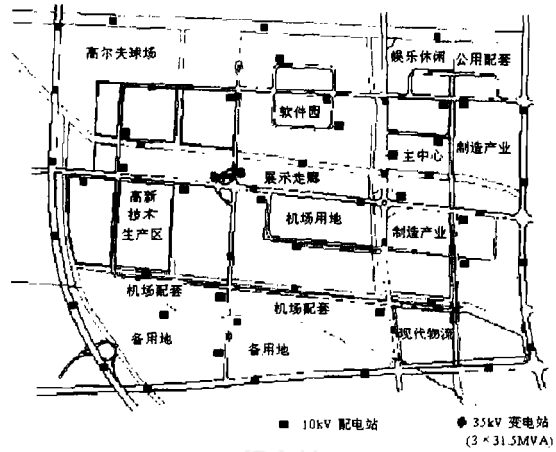

图 2 现有配电网络及可能扩展网络

ig 2 Present distribution network and the expanding network

表 1 各负荷节点的负荷需求

Tab. 1 Demand of each node in the network

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
负荷需求/kVA	100	315	630	500	240	240	300	100	630	500	250
节点号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
负荷需求/kVA	315	400	100	500	315	250	800	240	315	100	

算例 2中的 ACA有关参数设置为:$q=0.5$, $a_0=a_1=0.23$, $m=50$, $C_0=3\,000$, $C_1=4\,000$。运用基于蚁群的配电网规划程序计算优化结果如图 3所示。各配电站容量 2×800 kVA,35 kV高压配电站容量 3×31.5 MVA,总规划线路长度 31.6 km,规划总投资 2 875万元。

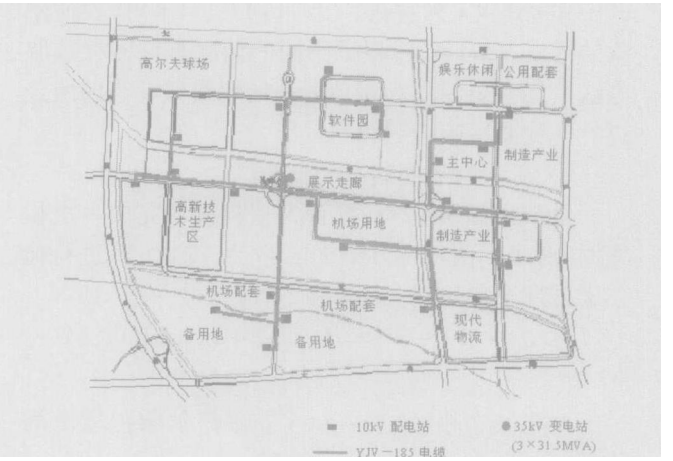

图 3 基于 ACA的最优规划方案

Fig 3 Optimal planning scheme based on ACA

5 结论

ACA是一种模拟自然界中蚂蚁觅食过程的高效的随机化内启发搜索算法,是一种全局性优化算法,适用于求解大规模的组合优化问题。本文详细探讨了 ACA应用于单阶段配电网规划,将配电网规划问题描述为非线性混合整数规划问题,并提出了相应的数学模型和求解算法。同时采用了生成树表达方案的解,以搜索可行解空间,提高算法效率,采用荷尔蒙强度的局部和全局更新,使算法收敛速度加快,算例表明基于 ACA的配电网规划方法是可行和有效的。

参考文献:

[1] 王锡凡. 电力系统优化规划 [M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
WANG Xi-fan. Power System Optimal Planning[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.

[2] Miranda V, Ranito J V, Procenca L M. Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1927-1933.

[3] WEN Fu-shuan, Chang C S. Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search method[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42(2): 153-163.

[4] Colorni A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[A]. Proceeding of ECAL91 - European Conference on Artificial Life. Paris: 1991. 134-142.

[5] Keun Y I, Chou C S, Song Y H. Application of the Ant Colony Search Algorithm to Short-term Generation Scheduling Problem of Thermal Units[A]. International Conference on Power System Technology. 1998. 552-556.

[6] 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.

[7] 陈根军,王 磊,唐国庆. 基于蚁群最优的配电网重构算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(2): 48-53.
CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Ant Colony Optimization Method [J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(2): 48-53.

[8] Romero R, Gallego R A, Monticelli A. Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing[A]. Proceedings of 1995 IEEE Power Industry Computer Application Conference (PICA '95). USA: 1995. 278-283.

[9] 翟海保,程浩忠,陈春霖,等. 基于改进蚁群算法的输电网络扩展规划 [J]. 中国电力, 2003, 36(12): 49-52.
ZHAI Hai-bao, CHENG Hao-zhong, CHEN Chun-lin, et al. An Improved Ant Colong Algorithm Planning for Transmission Network Expanding [J]. Electric Power, 2003, 36(12): 49-52.

[10] 赵 强, 敬东,李 正. 蚁群算法在配电网规划中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(2): 52-55.
ZHAO Qiang, JING Dong, LI Zheng. Application of Ant Colony Algorithm for Distribution System Planning [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(2): 52-55.

[11] 陈根军,王 磊,唐国庆. 基于蚁群最优的配电网规划方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(3): 71-75.
CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. An Ant Colony Optimization Method for Distribution Network Planning[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 71-75.

收稿日期: 2004-12-14; **修回日期**: 2005-08-11

作者简介:

胡 斌(1973 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化规划及电力系统负荷预测; E-mail: frankhb@sjtu.edu.cn

顾 洁(1971 -),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事电力系统规划和电力系统负荷预测等领域的科研和教学工作;

王衍东(1976 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化规划及电力系统负荷预测。

An ant colony optimization based method for power distribution network planning

HU Bin, GU Jie, WANG Yan-dong
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Distribution network planning is a complex combinatorial optimization problem. Although this problem has been extensively studied, it is still not well solved. In recent years, an ant colony algorithm is employed. It is a new meta-heuristic method. It is highly efficient for quickly finding high quality solutions to combinatorial optimization problems. In this paper, an improved ant colony algorithm is introduced to the distribution network planning, and the corresponding mathematical model and its solution algorithm are also presented. The feasibility and efficiency of the algorithm are verified by its application result in two sample systems.

Key words: distribution network; ant colony optimization (ACO); modern heuristic method