# 一种适合于解决辐射状配电网电容器最优配置问题的遗传算法

徐清平，解学书，滕人杰，沙佳瑜

(清华大学自动化系，北京 100085)

**摘要**：提出了一种可解决辐射状配电网电容器最优配置问题的遗传算法。将电容器看作离散变量，对给定的目标函数求最佳的电容器安装位置和容量；设计了针对该问题有效的遗传因子，并对一个实际的配电网进行了计算，得到了较好的结果。对遗传算法用于辐射状配电网的电容器最佳配置问题进行了探讨。

**关键词**：遗传算法；　遗传因子；　配电网；　无功优化；　电容器最优配置

**中图分类号**：TM714.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-4897(2001)09-0017-03

## 1　引言

提出了一种解决辐射状配电网电容器最优配置问题的遗传算法，电容器的容量、类型、安装位置，电压限制，负荷的变化等因素都考虑在内。目标是电容器安装后使有功网损、电容器的安装费用、购置费用加权后的总合最小。

电容器被广泛地安装在配电网中作为无功补偿、电压调节、和增加系统容量。电容器安装的方式决定了所取得的效果，如何安装电容器而取得最好的效益，即使有功网损、电容器的安装费用、购置费用的总合最小被称为电容器安装问题。早期解决这种问题的方法包括：1) 基于动态规划技术来解决离散的电容器容量配置；2) 将电容器的安装位置、容量作为连续的变量来对待，用非线性规划来解决这种问题；3) Baran and Wu 提出了另一种混合整数规划方法，并将配电网的潮流方程、不同电压等级的节点电压限制融合进问题中，并将电容器的安装位置作为离散变量[3]；4) Hsiao-Dong Chiang 等人将电容器的容量、安装位置作为离散变量，并考虑了不同负荷下的电压限制和实际的操作限制，所提的问题的目标函数是不可微的，并给出了一个基于模拟退火的算法[4]；5) Sundharajan S 等人提出了基因算法解决这个问题的算法，但该算法只能解决小规模的问题，效率不高[1]。本文在 Hsiao-Dong Chiang 等人工作的基础上采用一种改进的遗传算法来解决该问题。在潮流计算方法上采用了在配电网潮流计算中广泛采用的前推回推算法[2]。

## 2　辐射状配电网电容器最佳配置问题

一般情况下，该问题就是要确定电容器的位置、类型、和设定值，以减少系统的有功损耗，保持电压在规定范围内，并使包括电容器购买和安装费用在内的所有费用最小。考虑三种不同的负荷情况，在每种不同的情况下，考虑：1) 潮流方程，2) 节点电压的幅值的限制，3) 电容器的容量和设定值。

将电压限制表述为潮流方程，采用了一种配电网常用的前推回推算法[2]来求解。对于电容器配置问题，假设我们考虑 $n_t$ 个可能的负荷情况，潮流方程可以简要地描述为：

$$G^i(x^i, u^i) = 0 \qquad i = 1, 2, \cdots n_t$$

这里 $x^i$，$u^i$ 分别代表不同负荷下的状态和控制变量，即 $x^i = [\dot{p}, \dot{q}, \hat{v}_k^2]$，$u^i = \dot{Q}_c{}^i$；其中 $\dot{Q}_c^i$ 为各种负荷 $i$ 下各点设定的电容器值。电压限制可通过指定节点电压幅值的上下限来给定：

$$V_{\min}{}^2 \leq v_j^{i2} = \psi_j^i(x^i) \leq V_{\max}{}^2 \qquad j = 1 \cdots n$$

$$i = 1, \cdots, n_t$$

简述为：$H^i(x^i) \leq 0 \qquad i = 1, \cdots, n_t$

考虑到不同类型的电容器：固定类型的电容器在任一种负荷状况下都被看作一种无功源；可投切的电容器在不同的负荷状况下有不同的设定值。我们总是假设在峰值情况下的设定值比所有其他情况下的设定值大。

在某一种负荷状况 $i$ 下，系统的有功损耗为 $p_i(x^i, u^i)$，总的有功损耗可表示为：

$$k_e \sum_{i=0}^{n_t} T_i p_i(x_i, u^i)$$

这儿 $T_i$ 是负荷 $i$ 持续的时间，常数 $k_e$ 是每单位能量的费用。

实际情况下，电容器的大小值是一个离散的变量，这使得电容器的购买和安装费用变为一个阶梯函数，在某一点 $i$ 的电容器安装和购买费用可描述为：

$$C_i(u_i^0) = k_c u_i^0 / u_s + C_i^f(u_i^0)$$

其中 $k_c$ 是每单位电容器的购买费用，如果是固

定电容器则 $k_c = k_{c1}$,如果是可投切电容器则 $k_c = k_{c2}$,且 $k_{c1} \leq k_{c2}$。

综上所述,目标函数可表示为:

$$\sum_{k=1}^{n_c} C_k(u_k^0) + k_e \sum_{i=0}^{n_t} T_i p_i(x_i, u^i)$$

式中的 $n_c$ 是可能安装电容器的位置的总数。$n_t$ 是不同的负荷等级数。

整个问题的描述为:

$$\min_{u^0 u^i} \sum_{k=1}^{n_c} C_k(u_k^0) + k_e \sum_{i=0}^{n_t} T_i p_i(x_i, u^i)$$

使得:$u_k^0 = l_k \cdot u_s$ 这儿 $l_k$ 是一非负整数,$k \in n_c$

$u^i$ 的每个分量 $u_k^i$ 为离散变量,$i \in n_t$, $k \in n_c$

$G^i(x^i, u^i) = 0$, $i \in n_t$

$H^i(x^i) \leq 0$, $i \in n_t$

对于 $k \in C1 = \{$固定电容器$\}$, $u_k^i = u_k^j \leq u_k^0$ 且 $i, j \in n_t$

对于 $k \in C2 = \{$可投切电容器$\}$, $0 \leq u_k^i \leq u_k^0$ 且 $i \in n_t$

其中 $u_s$ 为单位电容器的容量,上面问题的目标函数是一个不可微函数。

## 3 算法改进和计算步骤

遗传算法[5]不仅能解决连续变量的优化问题,同样能解决病态的离散变量优化问题。能找到一群而不是一个最(次)优解,适合于并行计算。遗传算法如何处理限制条件以前的文献中涉及的不多,其中之一是用罚函数法,还有一些使用"decoder"或"repair"算法来避免产生一个非法的个体或者是逐个修复,但这些方法只对特殊的问题有用。我们是随机地给出一个解然后再检验它的可行性,重复几次,如果还没有找到可行解就放弃本次操作,这样做也增加了计算强度,也是算法变成只对该特殊的问题有效。本算法中染色体采用十进制数表示,十进制数表示虽不是处理限制条件的必要条件,但这种方法适合采用灵活的基因算子来获得算法本身好的实现。例如一些遗传算子的操作是不一致的,它可与群体的年龄有关。

变异算子:随机选择 $p_{um} * pop\_size$ 个染色体进行一致的变异,选择 $p_{bm} * pop\_size$ 个染色体进行边缘变异,选择 $p_{nm} * pop\_size$ 个染色体进行非一致的变异。$p_{um}$, $p_{bm}$, $p_{nm}$ 分别是下面定义的三种变异的概率。

一致变异:在染色体 $s_v^t = (v_1, \cdots, v_m)$ 中随机地选择一个基因 $v_k$,将该染色体变异为 $s_v^{t+1} = (v_1, \cdots, v_k', \cdots, v_m)$,其中 $v_k$ 是在 $[l_{(k)}^{svt}, u_{(k)}^{svt}]$ 中均匀分布的随机数。

边缘变异:是一致变异的一个变种,$v_k$ 等概率地变为 $l_{(k)}^{svt}$ 或 $u_{(k)}^{svt}$。

非一致变异:

$$v_k' = \begin{cases} v_k + \Delta(t, u_{(k)}^{s_v^t} - v_k) & \text{If a random digit is 0,} \\ v_k - \Delta(t, v_k - l_{(k)}^{s_v^t}) & \text{If a random digit is 1,} \end{cases}$$

函数 $\Delta(t, y)$ 返回一个 $[0, y]$ 中的值,当 $t$ 增加是 $\Delta(t, y)$ 变为 0 的概率增大。这个特性当 $t$ 值较小时使得该算子类似一致变异算子,当 $t$ 变大时为局部搜索。我们使用如下的函数:

$$\Delta(t, y) = y \cdot (1 - r^{(1 - \frac{t}{T})^b})$$

$r$ 为 $[0,1]$ 上的随机数,$T$ 为最大的遗传代数,$b$ 为调节非一致性的系统参数。

交叉算子:$s_v^t = (v_1, \cdots, v_m)$, $s_w^t = (w_1, \cdots, w_m)$ 是将要交叉的两个染色体,交叉后的结果:$s_v^{t+1} = (v_1', \cdots, v_m')$, $s_w^{t+1} = (w_1', \cdots, w_m')$。对于 $s_v^t$ 和 $s_w^t$ 的每个元素,产生一随机数 $r \in [0,1]$。如果 $r \leq a$ ($a$ 为 $[0,1]$ 上的静态参数),则交换 $s_v^t$ 和 $s_w^t$ 的该元素,否则,不交换该元素。

假设峰值负荷下需安装的电容器容量大于其它负荷下需安装的电容器容量,将电容器配置问题分解为两个子问题:1) 在重负荷下,将所有的电容器作为可变电容器,找到使有功损耗最小的电容器配置容量 $u_k^{i0}$,并假设这时需要安装电容器的位置是最好的安装位置,解决电容器安装位置的问题;2) 将 $u_k^{i0}$ 作为电容器配置的上限,在不同的负荷下计算需要安装的最佳电容器容量 $u_k^i (k = 0, \cdots, n_t)$, $n_t$ 为负荷的类别,并将 $u_k^i$ 与 $u_k^{i0}$ 求差 $du$,如果 $du$ 的某一分量为零而 $u_k^{i0}$ 的相应分量不为零则该位置应装固定容量的电容器 $u_k^0(i)$,否则应装可调节的电容器容量为 $u_k^0(i)$,再计算总的费用,这种算法可以避免遗传算法时间效率不够高的弱点而发挥该算法鲁棒性好的优势。

下面给出具体的迭代步骤:

(1) 给定每代的染色体个数 $p_{pop}$、遗传代数 $g$、以及各种变异和交叉的概率,假设配电网处于峰值负荷。

(2) 初始化,其中包括:

a) 随机地产生一个向量 $l$,其中的每个元素 $l_k$

都为非负整数;

b) 用 $l$ 的值初始化配电网,计算潮流,统计有功损耗,检查是否满足限制条件;若不满足,则转到 a),重新生成一个染色体,直到得到合法的染色体或循环到规定的次数;若满足限制条件则进行下面的 c);

c) 染色体的数目加 1,该数目是否等于规定的每代的染色体个数;否,重新生成一个 $l$,转到 a);是,结束初始化。

(3) 选择:计算每个染色体的适应度并排序,从上一代的染色体中按适应度的大小随机地选择 $P_{pop}$ 次,将这些染色体(可能重复)作为这一代的种群。

(4) 交叉:从(3)选中的染色体群中,随机地选择两个染色体配对,按上面给定的方法进行交叉。分别用交叉所得的后代对配电网进行初始化,计算潮流,统计有功损耗,检查是否满足限制条件;若这两个后代都不满足,则重新交叉生成一对染色体,直到得到两个合法的染色体或循环到规定的次数;若只有一个满足限制条件,则重新进行交叉,直到得到另一个合法的染色体或循环到规定的次数;若两个都满足限制条件,保存这两个后代。若本次交叉循环到规定的次数而没有得到合法的后代,则保留相应的父染色体。

(5) 变异:按给定的变异概率和变异方法进行变异,用产生的后代初始化配电网,计算潮流,统计线损,检查是否满足限制条件,若满足,保存后代;若不满足,重新计算直到得到合法的后代或循环到规定的次数;到规定的次数还没有得到合法的染色体,则保留父染色体。

(6) 检查是否循环到规定的代数,没有转到(3),否则进行下面的计算。

(7) 用得到的最优解决定电容器的最佳安装位置,并用得到的最佳向量 $l_{kopt}$ 作为下面计算的初始化的边界。假设配电网处于不同的负荷情况,以 $l_{kopt}$ 作为上限初始化 $l'_k$ 求各种负荷条件下的电容器最佳的设定值,并用本节上面给出的方法求 d$u$,由此判断各个安装位置应安装电容器的类型(是固定类型或可投切类型)。计算总的费用。给出计算结果。

## 4 数据结果

用本文给出的算法求解的一个实际配电网的电容器最佳配置问题,取得了比较合理的结果。假设每千瓦时的电费为 0.06 美元,每单位可投切电容器的价格为 1300 美元,每单位固定电容器的价格为 900 美元,每个安装位置的安装费用 1000 美元。

各种负荷及持续时间,见表 1。

表 1　不同负荷持续时间

| 负荷等级 | 持续时间(h) | 该负荷与额定负荷的比值 |
|---|---|---|
| 重负荷 | 2628 | 1.2 |
| 中等负荷 | 21024 | 1 |
| 轻负荷 | 2628 | 0.5 |

计算所得的结果见表 2 和表 3。

表 2　优化结果

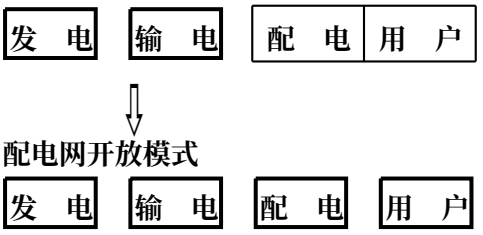
| 额定负荷 | | 有功损耗(kW) | | 最低电压(10kV) | | 总费用(万美元) | | 计算时间 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | 优化前 | 优化后 | |
| $P$ = 4.065MW<br>$Q$ = 3.042Mvar | 重负荷 | 463.2 | 341.5 | 0.8674 | 0.9599 | 48.44 | 38.76 | 223.6s |
| | 中负荷 | 315.5 | 233.5 | 0.8922 | 0.9524 | | | |
| | 轻负荷 | 84.8 | 68.4 | 0.9492 | 0.9804 | | | |

表 3　安装的位置及单元数(每单元为 300kvar)

| 节点号 | | 9 | 30 | 37 | 38 | 40 | 45 | 46 | 50 | 65 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 安装的单元数 | 重负荷 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| | 中负荷 | 1 | 2 | 0 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 轻负荷 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

## 5 结论

用遗传算法计算辐射状配电网的电容器最佳配置问题,可充分发挥遗传算法适应性好的特点,但计算速度是一较大的问题。如果将计算电容器类型和各种负荷情况下电容器的设定值等作为子问题嵌套在计算电容器安装位置问题中进行计算,即使各种遗传代数设为 50 代,对于我们给出的实际的 77 节点的配电网计算也需要 3h 左右的时间,如果计算 500 代,计算时间就会变得难以忍受。所以我们采用了一种变通的办法,计算电容器安装位置问题时只考虑峰值负荷,认为峰值负荷下,有功损耗最小的电容器安装点为最佳的电容器安装 (下转第 65 页)




我国电力市场正在摸索中前进,随着电力体制改革的深入,电力市场将不断完善。主要体现在:允许用户参与电力市场的竞争,双边交易成为电力交易的主要形式。增加实时交易的份额。进一步加强调度的作用和地位。加强技术服务的投入以促进全国联网形成。构筑完全竞争市场模式的中国电力市场。

**参考文献**:

[1] 姚建刚,章建. 电力市场分析. 高等教育出版社,1999.

**收稿日期**: 2001-05-10

**作者简介**: 闵南军(1958 - ),女,助工,从事电力继保运行维护工作; 毛知新(1972 - ),男,工程师,从事电力自动化设计工作。

**The necessity of electricity market formation and the development trend of the market**

MIN Nan - jun[1], MAO Zhi - xin[2]

(1. Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong, Meizhou 514000, China;
2. Xiangneng XJ Hi - tech Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract**: The development of electricity industry needs electricity market as the progress of economic system reform in China. Facing to the successful operation of world electricity market and construction of the Three - Gorges Hydro Power Station, we have to select a successful electricity market mode.

**Keywords**: electricity market; necessity; development trend

(上接第 19 页) 地点。这样对问题作了一定程度的简化,节约了计算时间,但牺牲了一些计算精度。另一个可能改进的地方是交叉和变异时对约束条件的处理方法,我们虽然提出了一个效率较高的方法,但如果有更高效率的处理约束条件的方法,也可能改进计算速度。

**参考文献**:

[1] Sundharajan S, Pahwa A. Optimal selection of capactor for radial distribution system using a genetic algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1499 - 1507.

[2] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究. 中国电机工程学报,1999, 19(7): 26 - 29.

[3] Baran M E and Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System. IEEE PES Winter Meeting, 1988, paper no 88WM065-8.

[4] Hsiao-Dong Chiang, Jin-Cheng Wang, Orville Cockings and Hyoun-Duck Shin. Optimal Capacitor Placements in distribution System: Partl: A New Formulation and the Overall Problem. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 634-649.

[5] Zbigniew Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. New York: Springer-Verlag, c1994.

**收稿日期**: 2001-01-17

**作者简介**: 徐清平(1968 - ),男,工程师,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程; 解学书(1934 - ),男,教授,研究方向为控制理论与工程、计算机应用; 滕人杰(1952 - ),女,副教授,研究方向为自动控制。

**An evolutionary algorithm in solving problems of optimal capacitor placement on radial distribution systems**

XU Qing-ping, XIE Xue-shu, TENG Ren-jie, SHA Jia-yu

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract**: This paper raises an evolutionary algorithm in solving problems of optimal capacitor placement on radial distribution systems. In the algorithm, capacitors are considered as discrete variables composed with discrete elements to obtain optimum position and capacity from given objective functions. An effective crossover operator and mutation operator is designed in respect to this problem, and a reasonable result is achieved with the above mentioned algorithm in a practical optimization problem used for a distribution system. The topic of evolutionary algorithm in solving problems of optimal capacitor placement on radial distribution systems is discussed.

**Keywords**: evolutionary algorithm; evolutionary operator; distribution systems; reactive power optimization; capacitor optimal placement