

# 基于改进遗传算法的配电网无功优化

赵 昆, 耿光飞

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 对配电网无功优化问题进行了研究。针对无功优化问题的特点, 提出了一种应用于电力系统无功优化问题的改进遗传算法。该算法将迭代群体分为一般组和精英组, 对一般组进行交叉和变异操作, 而对精英组只进行变异操作, 实现分组进化。在该算法中利用整数和浮点数混合编码, 并对遗传算法的选择、交叉、变异算子进行改进, 采用自适应罚因子、交叉率和变异率, 提高了收敛速度和解的质量。采用 IEEE6 节点系统验证了所提算法的有效性和实用性。

**关键词:** 无功优化; 自适应罚因子; 改进遗传算法; 分组进化

## Reactive power optimization of distribution network based on improved genetic algorithm

ZHAO Kun, GENG Guang-fei

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The method of reactive power optimization in distribution power network is studied. Based on the characteristic of reactive power optimization, an improved genetic algorithm is proposed. In the algorithm, the iterative generation is divided into the common group and the elite group. The crossing and mutation operation are implemented to the common group, and the mutation operation is implemented only to the elite group to realize the separated groups' evolution. The algorithm adopts hybrid coding of integer and floating point numbers, improves the selection, crossing and mutation operator of genetic algorithm and makes use of adaptive penalty factor, crossing rate and mutation rate to enhance the convergence speed and the quality of solution. The IEEE6-bus system test shows the effectiveness and practicality of the proposed methods.

**Key words:** reactive power optimization; adaptive penalty factor; improved Genetic algorithm; evolution of separated groups

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0057-06

## 0 引言

无功优化是降低电力系统有功损耗、提高电能质量、提高电网经济运行的一种有效手段, 历来受到各方专家、学者的关注。无功优化就是通过调节发电机端电压、变压器变比和并联补偿电容等来满足电力系统的无功需求, 达到改善系统电压、降低损耗的目的。

配电网无功优化规划是一个多目标、多变量、多约束的混合非线性规划问题, 随着配电网中节点数的增多, 计算量呈指数形式增加。近年来, 多种启发式优化算法<sup>[1-4]</sup>被应用于配电网无功优化, 并取得了较好的效果。其中遗传算法在无功优化问题中运用相对较多, 它采用多路径搜索, 对控制变量

进行编码处理, 然后对编码进行遗传操作, 这样可以更好地处理离散变量。遗传算法用目标函数本身建立寻优方向, 无需求导逆等数学运算, 且可以方便地引入各种约束条件, 适合于处理混合整数非线性规划和多目标优化。但是遗传算法也存在一些不足之处, 如传统遗传算法的二进制编码对于多变量的无功优化问题计算量太大, 单点交叉又显得单一而不利于全局寻优; 一些改进遗传算法在一定程度上提高了算法的性能, 但仍存在各种不足。文献[5]中通过计算比较得到了变异率的经验取值, 实用性较差且不利于全局寻优; 文献[6]电压越限罚因子为1, 而文献[5]中为3 000, 两者相差3个数量级, 这说明在罚因子的处理上仍缺乏规则可循。鉴于此, 本文结合无功优化问题的特点对传统遗传算法进行改进。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助(2006BAJ04B06)

## 1 无功优化数学模型

### 1.1 约束条件

无功优化的控制变量包括发电机的机端电压、补偿点的补偿量和可调变压器变比等；状态变量包括发电机无功出力及各节点电压值。

各变量的约束条件包括等式约束和不等式约束，其中等式约束即有功、无功的潮流方程，如式(1)。

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $V_i$ 分别为节点*i*处注入的有功、无功和电压； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\delta_{ij}$ 分别为*i*、*j*之间的电导电纳和相角差； $N_B$ 为节点总数。

控制变量的不等式约束如式(2)。

$$\begin{cases} T_{i \min} < T_i < T_{i \max} \\ C_{j \min} < C_j < C_{j \max} \\ V_{g \min} < V_g < V_{g \max} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中： $T_i$ 为可调变压器变比； $T_{i \min}$ 、 $T_{i \max}$ 为其上下限值； $C_j$ 为*j*节点的补偿量， $C_{j \min}$ 、 $C_{j \max}$ 为其上下限； $V_g$ 为发电机节点的电压值， $V_{g \min}$ 、 $V_{g \max}$ 为其上下限值。

状态变量的不等式约束如式(3)。

$$\begin{cases} V_{i \min} < V_i < V_{i \max} \\ Q_{g \min} < Q_g < Q_{g \max} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中： $V_i$ 、 $V_{i \min}$ 、 $V_{i \max}$ 为节点电压及其上下限； $Q_g$ 、 $Q_{g \min}$ 、 $Q_{g \max}$ 为发电机节点的无功出力及其上下限值。

### 1.2 目标函数

本文以有功网损最小为目标函数，并把状态变量约束以罚函数形式加到目标函数中，如式(4)。

$$\begin{aligned} \min F &= P_L + \lambda_V F_V + \lambda_Q F_Q \\ F_V &= \sum_{i=1}^{N_{\text{notG}}} \left( \frac{V_i - V_{i \lim}}{V_{i \max} - V_{i \min}} \right)^2 \\ F_Q &= \sum_{i=1}^{N_G} \left( \frac{Q_g - Q_{g \lim}}{Q_{g \max} - Q_{g \min}} \right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中： $P_L$ 为系统的有功网损； $F_V$ 、 $F_Q$ 分别为状态变量电压、无功的越界罚函数； $\lambda_V$ 、 $\lambda_Q$ 分别为状态变量电压、无功的罚系数； $V_{i \lim}$ 为状态变量电压的上限值或下限值， $Q_{g \lim}$ 为状态变量无功的上限值或下限值； $N_{\text{notG}}$ 为除发电机外的所有节点数、 $N_G$ 为发电机节点数。

## 2 对遗传算法的改进

### 2.1 整实数混合编码

无功优化问题的控制变量既包括连续性变量，如发电机的节点电压；又包括离散型变量，如补偿节点的补偿量、可调变压器分接头档位。因此，本文针对控制变量的特点采用浮点数和整数混合编码的方法，具体操作见式(5)。

$$X = [V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{Gi}, \dots, V_{Gnum}; T_{tk1}, T_{tk2}, \dots, T_{tki}, \dots, T_{tknum}; C_{q1}, C_{q2}, \dots, C_{qi}, \dots, C_{qnum}] \quad (5)$$

式(5)中： $V_{Gi}$ 、 $T_{tki}$ 、 $C_{qi}$ 分别为发电机节点电压、可调变压器变比的档位、补偿电容量的步长。其中 $V_{Gi}$ 为连续性变量采用浮点数编码，而 $T_{tki}$ 和 $C_{qi}$ 为离散型变量采用十进制整数编码。 $Gnum$ 、 $tknum$ 、 $qnum$ 分别为发电机节点数、可调变压器支路数、补偿节点数。

### 2.2 分组进化

在群体遗传进化过程中，所有个体的质量有优劣之分，如果对所有的个体都进行相同的操作不仅会影响解的质量还会影响进化的速度。一般或较差的个体可对其进行交叉和变异操作，且应对应较大的交叉率和变异率，如果对较优的个体也进行与之相同的操作则很可能会使其良好性被破坏，相反一般或较差的个体对应较小的变异率和交叉率，则会减弱群体的多样性。

因此本文采用分组进化的方法，首先对所有个体按适应度大小降序排列，取其前几个较优个体作为精英组；其余个体通过对所有个体用轮盘赌的方法选出作为一般组。具体操作步骤如下：

(1) 把所有个体按适应度大小降序排列。

排序前的群体：

$$Group = [f_1, f_2, \dots, f_m, f_{m+1}, f_{m+2}, \dots, f_{GroupNum}]$$

排序后的群体：

$$Group' = [f'_1, f'_2, \dots, f'_m, f'_{m+1}, f'_{m+2}, \dots, f'_{GroupNum}]$$

式中： $f$ 、 $f'$ 分别为排序前、后的适应度值； $GroupNum$

为群体规模。

(2) 取排序后的群体  $Group'$  的前  $m$  个个体  $[f'_1, f'_2, \dots, f'_m]$  作为精英组, 因为精英组个体已经接近最优解, 所以精英组只参与变异运算, 且变异率较小, 通过变异在较优个体邻域中搜索, 使群体稳定进化以取得更优以便找到全局最优解。

(3) 对排序前的群体  $Group$  进行轮盘赌选择, 把选出的  $GroupNum-m$  个个体作为一般组, 一般组通过交叉、变异在进化寻优的同时保持多样性以更新下次循环的精英组个体。

(4) 另外, 在每次循环的选择过程中采用最优保存策略。

对群体优劣分组, 进行分组进化, 其操作流程见图 1。

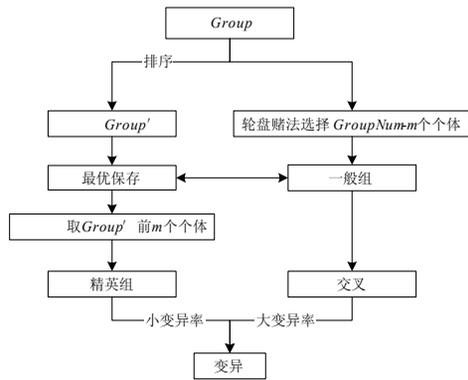


图 1 分组进化

Fig.1 Evolution of separated groups

## 2.3 一般组的处理

### 2.3.1 交叉操作

在无功优化问题中, 由于优化控制变量较多, 染色体的长度较长, 宜采用多点均匀杂交法, 均匀杂交随机地决定两个父辈的各个基因是否交换, 可以形成任意形式的模式, 有助于搜索到解空间的新领域, 保证解得多样性。

本文通过设置一个二进制屏蔽字确定父代个体的交叉位置, 同时引入算术交叉的思想, 以两个个体的算术运算代替均匀交叉中两父个体基因的交流操作。

具体操作如下:

首先产生屏蔽二进制码  $M = [m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_{num}]$ , 其中  $m_i$  为 0 或 1,  $num = Gnum + tknum + qnum$ , 即染色体编码串长度。

然后根据  $m_i$  的值来确定是否进行交叉操作, 若为 1 则进行交叉, 若为 0 则保持不变。

整型变量的交叉操作如式 (6) 所示。

$$\begin{cases} X_{s1} = \text{int}(\alpha X_{f1} + (1-\alpha)X_{f2}) \\ X_{s2} = \text{int}(\alpha X_{f2} + (1-\alpha)X_{f1}) \end{cases} \quad (6)$$

浮点型变量的交叉操作如式 (7) 所示。

$$\begin{cases} X_{s1} = \alpha X_{f1} + (1-\alpha)X_{f2} \\ X_{s2} = \alpha X_{f2} + (1-\alpha)X_{f1} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $X_{f1}$ 、 $X_{f2}$  分别为父代两个个体交叉位置基因对应的变量值;  $X_{s1}$ 、 $X_{s2}$  分别为交叉后产生的子代两个个体对应的变量值。

### 2.3.2 变异操作

变异操作对维持种群的多样性和抑制早熟起到重要作用。类似交叉操作, 首先产生屏蔽二进制码, 根据二进制码位的值判断是否进行变异操作。

整型变量的变异操作如式 (8) 所示。

$$X_{si} = X_{fi} \pm (X_{fi\max} - X_{fi\min}) \text{rand} \quad (8)$$

浮点型变量的变异操作如式 (9) 所示。

$$X_{si} = X_{fi} \pm (X_{fi\max} - X_{fi\min}) \text{rand} \quad (9)$$

式中:  $X_{si}$ 、 $X_{fi}$  分别为子代、父代变异位置基因的变量值;  $X_{fi\max}$ 、 $X_{fi\min}$  分别为对应变量的上下限值;  $\text{rand}$  为 0、1 间的随机数。

### 2.3.3 采用自适应交叉率和变异率

交换率<sup>[7]</sup>是一个重要的参数, 较大的交换率可增强遗传算法开辟新的搜索区域的能力, 但适应度高的基因遭到破坏的可能性也增大, 从而使搜索走向随机化; 若交换率太低, 就会使较多的个体直接复制到下一代, 遗传搜索可能陷入迟钝状态。

简单遗传算法中, 交换率是一个常量。文献[8]通过计算比较选择交换率为 0.8, 文献[9]建议最优交换率范围为 0.75~0.95。考虑到遗传算法优胜劣汰的进化机制本文采用自适应交叉率, 设计自适应交叉率如式 (10), 在迭代初期, 群体质量较差, 较高的交换率可以产生更优的个体, 保证进化速度和群体质量; 在迭代后期, 群体质量较高, 较低的交换率不会破坏优良基因, 使算法平稳收敛。

$$p_c^t = \begin{cases} p_{c,\max} & p_c^t > p_{c,\min} \\ 1 + t/t_{\max} & \\ p_{c,\min} & p_c^t < p_{c,\min} \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中:  $p_c^t$  为第  $t$  代交叉率;  $p_{c,\max}$  为最大交

叉率； $p_{c,\min}$  为最小交叉率； $t$  为进化代数； $t_{\max}$  为最大迭代次数。

变异率在遗传进化过程中也是一个重要的参数，变异率较大，会使进化的随机性增大，不容易得到稳定解；变异率过小，降低群体的多样性，将导致早熟，容易陷入局部最优解。

因此自适应变异率就显得尤为重要，使遗传算法具有更高的鲁棒性、全局最优性。文献[10]设计了与遗传代数密切相关的自适应变异率，但是每个个体的变异率相同，没有针对性。本文设计变异率公式(11)：

$$p_{i,m}(t) = \begin{cases} p_{\max} e^{(f_i - f_{\text{aver}}) e^{-t}} & f_i > f_{\text{aver}} \\ p_{\max} & f_i < f_{\text{aver}} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中： $p_{i,m}(t)$  为第  $t$  次迭代的群体中第  $i$  个个体的变异率； $p_{\max}$  为最大适应变异率； $f_i$  为第  $i$  个个体的适应度值； $f_{\text{aver}}$  为平均适应度值； $t$  为迭代次数。

#### 2.4 精英组的处理

2.3 节中提到的交叉变异都是针对一般组的，而精英组在进化过程中都是质量较优的个体，因此只需对其进行小邻域搜索。本文对精英组进行如下操作。

- (1) 不进行交叉操作。
- (2) 采用单点变异。
- (3) 采用较小的变异率。设计变异率公式：

$$p_m(t) = p_{\min} (1 + e^{-t}) \quad (12)$$

式(12)中： $p_m(t)$  为第  $t$  次迭代精英组的变异率； $p_{\min}$  为最小变异率； $t$  为迭代次数。

#### 2.5 适应度函数

本文以网损最小为目标函数，即目标函数最小为最优解，所以需要有一个将最小目标函数转化为求最大适应度函数的过程，并保证非负。文献[11]采取式(13)：

$$f_{\text{itess}} = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ C_{\max} - F & F < C_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中： $f_{\text{itess}}$  为适应度函数； $F$  为目标函数； $C_{\max}$  为很大的一个正数。 $C_{\max}$  的取值不好把握，取得太小则不能保证  $f_{\text{itess}}$  为正值，取得太大又容易把目标函数值  $F$  淹没。本文采取转化公式(14)：

$$f_{\text{itess}} = \frac{k}{F} \quad (14)$$

式(14)中： $K$  为修正系数， $f_{\text{itess}}$ 、 $F$  同式(13)。

适应度值是用来区分进化中个体的好坏的，适应度值大的个体就越好，适应度值小的个体就差。遗传算法在无功优化中应用时，个体的适应度值差别并不是特别的大，尤其在迭代后期，这将影响收敛速度，基于此对适应度函数进行修正，文献[12]修正方法为：

$$\begin{aligned} f_{\text{mod}i} &= f_i - \lambda f_{\min} \\ f_{\text{mod} \max} &= f_{\max} - \lambda f_{\min} \\ f_{\text{mod} \min} &= (1 - \lambda) f_{\min} \\ f_{\text{mod} \text{aver}} &= \frac{\sum_{i=1}^N f_{\text{mod}i}}{N} \end{aligned} \quad (15)$$

式中： $\lambda$  为介于 0.9 与 1 之间的正数； $f_i$  为个体  $i$  的适应度函数值； $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$  为群体中最大、最小适应度函数值； $f_{\text{mod} \text{aver}}$  为修正后的平均适应度值； $f_{\text{mod}i}$  为修正后个体  $i$  的适应度值； $f_{\text{mod} \max}$ 、 $f_{\text{mod} \min}$  为修正后的最大、最小适应度值。

上述修正方法，在增大个体间适应度差值的程度上有一定效果，但由公式可以看出每个个体在每次迭代过程中都要减去一个数，适应度函数值会随着群体的进化越来越小，且效果不是特别明显，基于此本文设计修正公式如式(16)：

$$f_{i,\text{mod}} = f_i e^{\frac{(f_i - f_{\text{aver}})}{f_{\max}}} \quad (16)$$

式中： $f_i$  为修正前个体的适应度值； $f_{i,\text{mod}}$  为修正后的适应度值； $f_{\text{aver}}$  为修正前的平均适应度值； $f_{\max}$  为修正前的最大适应度值。

由公式可以看出，修正后的适应度值与修正前的适应度值相比，相对于修正前平均适应度值是向两端发散的，即各个个体之间的适应度值之差都是在增大的。

#### 2.6 自适应罚系数

式(4)中罚系数的选取很关键，直接影响算法的收敛性和解的质量。优化开始时的初始解群体是随机产生的，罚函数项应在目标函数中占主导地位，尽快把越界个体淘汰，以使解群体尽快进入可行解范围内充分利用迭代空间。随着迭代进行，罚函数项应逐渐削弱，使解群体有一个较大的搜索空间以便达到全局收敛。在迭代末期应重新使罚函数项占主导地位，以把处在约束条件边界上和边界外

的个体淘汰。

总之罚函数项在迭代初期占主导地位, 使进化机制有一个较好的迭代群体; 在迭代末期仍占主导地位, 把较优个体中越界个体淘汰; 中间迭代过程中以网损为主导, 尽量找到网损最小的最优解。罚因子的具体公式如式 (17) 所示。

$$\lambda_V = M_V (af(t) + c)$$

$$\lambda_Q = M_Q (bf(t) + d)$$

$$f(t) = \begin{cases} \exp((t-0.5k)/(\alpha k)) & t \geq 0.5k \\ \exp((0.5k-t)/(\beta k)) & t < 0.5k \end{cases}$$

$$M_V = \begin{cases} \text{Mag}(P_L / F_V) & F_V \neq 0 \\ 0 & F_V = 0 \end{cases}; \quad M_Q = \begin{cases} \text{Mag}(P_L / F_Q) & F_Q \neq 0 \\ 0 & F_Q = 0 \end{cases}$$

(17)

式中:  $\lambda_V$ 、 $\lambda_Q$ 、 $P_L$ 、 $F_V$ 、 $F_Q$  见式 (4);  $\text{Mag}(x)$  意为  $\text{Mag}$  取  $x$  的数量级;  $M_V$ 、 $M_Q$  把  $F_V$ 、 $F_Q$  修正到与  $P_L$  相同的数量级, 此时就可以很方便地来确定罚系数。罚函数项由大到小再到大大通过  $f(t)$  实现,  $f(t)$  是一个 U 型曲线函数, 其波动幅度可由  $\alpha$ 、 $\beta$  来调节,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为 (0.5, 1) 中的实数;  $a$ 、 $b$  分别为 (0, 2) 中的实数, 对  $f(t)$  进行伸缩操作;  $c$ 、 $d$  分别为  $[-1, 0]$  中的实数, 对  $f(t)$  进行平移操作;  $t$  为迭代次数;  $k$  为最大迭代次数; 改变  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  的值可以调整罚函数项在目标函数中所占的比例, 例如, 当  $\alpha = \beta = 1$ ,  $a = b = 1.5$ ,  $c = d = 1$  时,  $f(t)$  随迭代进行由 1.4 → 0.5 → 1.4 变化。

### 2.7 迭代终止条件

由于本文算法进行分组进化的同时还运用最优保存的策略, 同时为了充分发挥自适应交叉率、变异率、罚因子的作用, 本文以最大迭代次数为终止条件。

### 2.8 程序框图

利用改进遗传算法求解无功优化问题的程序框图如图 2。

## 3 算例分析

为了验证本文算法的可行性, 本文采用 C++ Builder 6.0 编程, 选取 IEEE6 节点系统进行计算, 该系统接线如图 3 所示, 该系统详细参数见参考文献[13]。

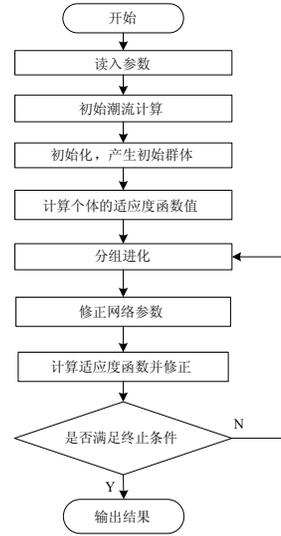


图 2 优化算法流程图

Fig.2 Flowchart of optimization algorithm

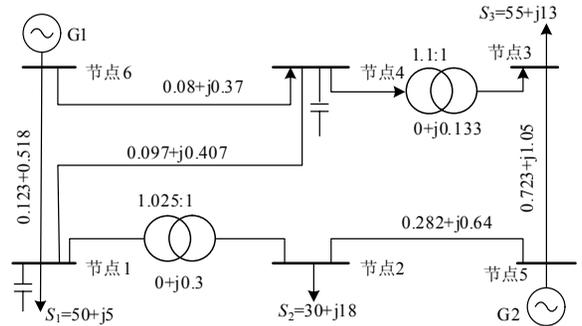


图 3 IEEE6 节点系统

Fig.3 Diagram of IEEE6 nodes system

该系统中节点 1、2、3、4 为 PQ 节点, 节点 5 为 PV 节点, 节点 6 为平衡节点。发电机电压 (p.u, 以下用到的电压值均为标么值)  $V_6=1.1$ ,  $V_5=1.1$ , 节点 4、6 的初始补偿量均为 0。选基准容量为 100 MVA, 经初始潮流计算, 网损为 11.61 MW, 且节点 3 的电压值为 0.855。

由图 3 可知, 控制变量有 6 个, 分别为两变压器支路变比、两发电机的输出电压、4 和 6 节点的无功补偿量。遗传算法各参数设置如下: 种群规模 30; 最大迭代次数 80; 交叉率以及变异率分别按 2.3 节和 2.4 节中求得。IEEE6 节点系统控制变量的上下限以及初始潮流计算的控制变量值见表 1。

通过传统遗传算法和本文算法优化计算后, 网损值 (3 次计算结果的平均值) 分别为 9.098 MW、8.89 MW, 与优化前的网损值 11.61 MW 相比明显

降低, 详细结果见表 2。

表 1 控制变量的设定

Tab.1 Setting of control variables

变量	上限	下限	初始潮流
$tk_{4,3}$	1.11	0.91	1.1
$tk_{1,2}$	1.11	0.91	1.025
$q_{c1}$	0.055	0	0
$q_{c2}$	0.050	0	0
$V_6$	1.1	1.0	1.05
$V_5$	1.15	1.1	1.1

表 2 详细优化结果对比

Tab.2 Comparison of detailed optimization results

变量	传统遗传算法计算次数			本文算法计算次数		
	1	2	3	1	2	3
$tk_{4,3}$	0.935	0.935	0.985	0.960	0.960	0.960
$tk_{1,2}$	0.96	0.35	0.96	0.935	0.935	0.96
$q_{c1}$	0.005	0.01	0.04	0.035	0.03	0.03
$q_{c4}$	0.025	0.015	0.015	0.05	0.04	0.045
$V_6$	1.1	1.1	1.1	1.1	1.098	1.1
$V_5$	1.15	1.15	1.146	1.149	1.145	1.15
$P_L$	9.129	9.111	9.055	8.818	8.950	8.896

优化前节点 3 的电压为 0.855, 通过优化计算节点 3 的电压调整到了 0.99 左右。在传统遗传算法和本文算法中状态变量均无越限(状态变量, 电压上下限分别为 1.05、0.9; 发电机无功出力上下限分别为 100 Mvar、0)。

#### 4 结论

针对无功优化数学模型的特点, 本文对传统遗传算法进行改进。状态变量以罚函数的形式加到目标函数中, 采用自适应罚系数, 设计了目标函数到适应度函数的转化公式, 并修正了适应度函数; 对传统的二进制编码方法加以改进, 采用浮点数和整数混合编码的方法。在进化过程中对群体进行分组, 分为精英组和一般组, 并对两组采用不同的进化机制, 使群体在稳定寻优的同时保持着群体的多样性; 还采用自适应交叉率和变异率; 本文算法已用 C++Builder6.0 编程实现, 并以 IEEE6 节点算例进行验证, 与传统遗传算法相比, 本文算法能更精确地收敛到全局最优解、收敛速度也有很大提高。

#### 参考文献

- [1] 段涛, 陈维荣, 戴朝华, 等. 多智能体搜寻者优化算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 10-15.  
DUAN Tao, CHEN Wei-rong, DAI Chao-hua, et al. Reactive power optimization in power system based on multi-agent seeker optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 10-15.
- [2] 史燕琨, 熊华强. 基于伪并行遗传算法的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 57-60.  
SHI Yan-kun, XIONG Hua-qiang. Optimal capacitor arrangement based on pseudo parallel genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 10-15.
- [3] 王瑞, 林飞, 游小杰, 等. 基于遗传算法的分布式发电系统无功优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 24-27.  
WANG Rui, LIN Fei, YOU Xiao-jie, et al. Research on the reactive power control of distributed generation system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 24-27.
- [4] 王彬, 滕欢. 基于灵敏度分析的粒子群无功优化算法[J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 15-18.  
WANG Bin, TENG Huan. Particle swarm reactive optimization algorithm based on sensitivity analysis[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2007, 30(1): 15-18.
- [5] 赵景德. 基于遗传算法的本溪地区配电网无功优化[J]. 东北电力技术, 2008(6): 29-33.  
ZHAO Jing-de. Optimal reactive power planning based on genetic algorithms in Benxi area[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(6): 29-33.
- [6] 万盛斌, 陈明军. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 浙江电力, 2005(1): 8-12.  
WAN Sheng-bin, CHEN Ming-jun. Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm[J]. Zhejiang Electric Power, 2005(1): 8-12.
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic algorithms: theory and applications[J]. Beijing: Defense Industry Press, 2000.
- [8] Srinivasan Sundhararajan, Anil Pahawa. Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3).
- [9] Michale Z. A modified genetic algorithms for optimal control problems[J]. Computers Math Applic, 1992(12).
- [10] 张金奎, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[C]. //第十四届学术年会论文集. 1998, (10).  
ZHANG Jin-kui, et al. Optimal reactive power planning based on genetic algorithms[C]. //The Fourteenth Academic Annual Meeting Symposium. 1998(10).

公司, 2009.  
Q/GDW 383-2009 technical guide for smart substation[S]. State Grid Corporation of China, 2009.

[2] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 8-14.  
LIN Yu-feng, ZHONG Jin, WU Fu-li. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33 (12): 8-14.

[3] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术, 2009, 33 (13): 12-18.  
ZHONG Jin, ZHENG Rui-min, YANG Wei-hong, et al. Construction of smart grid at information age[J]. Power System Technology, 2009, 33 (13): 12-18.

[4] 王映辉. 软件构件与体系结构—原理、方法与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
WANG Ying-hui. Software components and architecture-principles, methods and techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[5] 吴国阳, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11): 15-18.  
WU Guo-yang, WANG Qing-ping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (11): 15-18.

[6] 庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 146-150.  
PANG Hong-mei, LI Huai-hai, ZHANG Zhi-xin, et al. Research situation of 110 kV smart substation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 146-150.

[7] 苏永春, 吴素农. 江西电网智能变电站研究及建设展望[J]. 江西电力, 2009, 33: 1-4, 9.  
SU Yong-chun, WU Su-nong. Research and development prospect of smart substation of Jiangxi power grid[J]. Jiangxi Electric Power, 2009, 33: 1-4, 9.

[8] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33 (11): 6-11.  
DING Ming, ZHANG Ying-yuan, MAO Mei-qin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33 (11): 6-11.

[9] 潘睿, 刘俊勇, 郭晓鸣. 面向智能电网的电力系统云计算[J]. 四川电力技术, 2009, 32 (增刊): 6-10, 37.  
PAN Rui, LIU Jun-yong, GUO Xiao-ming. Cloud computing of smart grid in power system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32 (S): 6-10, 37.

[10] Q/GDW 431-2010智能变电站自动化系统现场调试导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.  
Q/GDW 431-2010 guide line for the site commissioning of automation systems in smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009.

[11] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析[J]. 华东电力, 2008, 36 (11): 37-39.  
CHEN Jian-min, ZHOU Jian, CAI Lin. Substation secondary technology demand analysis for intelligent grid vision[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (11): 37-39.

[12] 何磊, 郝晓光. 数字化变电站通信网络的性能测试技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 75-78.  
HE Lei, HAO Xiao-guang. Acceptance test technology of communication network in digitalized substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 75-78.

[13] 莫卫东, 杨任农, 赵静波, 等. 计算机网络技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
MO Wei-dong, YANG Ren-nong, ZHAO Jing-bo, et al. Computer network technology and applications[M]. China Machine Press, 2009.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-12

作者简介:

曹楠(1981-), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: caonan@epri.sgcc.com.cn

李刚(1978-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化;

王冬青(1972-), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(上接第 62 页 continued from page 62)

[11] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法—遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
LIU Yong, KANG Li-shan, CHEN Yu-ping. Non numerical parallel algorithms-genetic algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[12] 胡彩娥. 农村配电网无功优化方案的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.  
HU Cai-e. Reactive power optimal for distribution systems of rural[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001.

[13] 吴砥, 张文峰. 地区电网无功配置优化方法的探讨[J]. 高压技术, 2003, 29 (5): 21-23.  
WU Di, ZHANG Wen-feng. Study on reactive power scheme in electric power network[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (5): 21-23.

收稿日期: 2010-03-04

作者简介:

赵昆(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网无功优化; E-mail: zhaokunfx@126.com

耿光飞(1971-), 男, 副教授, 硕导, 研究方向为电网无功优化与经济运行。