

## 基于改进算子的免疫遗传算法的电压无功优化

周攀<sup>1</sup>, 范旭娟<sup>2</sup>, 肖潇<sup>3</sup>, 徐璽宇<sup>1</sup>, 曾雯珺<sup>1</sup>, 陈立<sup>1</sup>, 彭杰<sup>4</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510410;  
3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 国网武汉供电公司检修分公司电缆运检室, 湖北 武汉 430034)

**摘要:** 针对电压无功优化问题的特点和免疫遗传算法在求解全局性优化问题中的适用性, 应用免疫遗传算法对系统进行电压无功优化。在编码时采用了实整混合编码形式, 求抗体相似度时进行了归一化处理, 在选择操作时对适应度函数进行了变换, 合理的选择变换系数的值, 可以保证算法在进化前期保持种群多样性, 在进化后期仍能有较快收敛速度, 并在交叉变异时实数段和整数段基因采取不同的措施。取 IEEE-30 节点标准系统为例, 利用开发的优化计算程序进行电压无功优化计算, 验证了所提出的算法较其他算法在计算和收敛能力上具有优势。

**关键词:** 全网无功优化; 免疫遗传算法; 实整混合编码; 无功补偿; 适应度变换

### Voltage and reactive power optimization based on immune genetic algorithm of improved operator

ZHOU Pan<sup>1</sup>, FAN Xu-juan<sup>2</sup>, XIAO Xiao<sup>3</sup>, XU Zhao-yu<sup>1</sup>, ZENG Wen-jun<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, PENG Jie<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Electric Power Test and Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510410, China; 3. College of Electrical Engineering & New Energy, Yichang 443002, China; 4. State Grid Maintenance Branch of Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430034, China)

**Abstract:** According to the characteristic of voltage and reactive power optimization problem and the applicability of the immune genetic algorithm in solving global optimization problems, this paper applies immune genetic algorithm for voltage reactive power optimization system. It adopts the hybrid coding form when encodes and normalizes the similarity of antibodies, and takes transformation of fitness function in the choice of operation. The reasonable choice of transform coefficient value can maintain the population diversity algorithm in the early stage of the evolution and can still have a faster convergence speed in the late evolution. And it takes different measures in real number and integer gene in crossover and mutation. Taking the standard IEEE-30 node system for example and using optimization procedures to make reactive power optimization calculation, this paper verifies the proposed method has advantages in computing and convergence capabilities compared with other algorithms.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807041).

**Key words:** global reactive optimization; immunity genetic algorithm; hybrid coding; reactive power compensation; fitness transformation

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0110-06

## 0 引言

电压无功优化<sup>[1-3]</sup>就是在满足各种运行约束条件的前提下, 以发电机端电压、有载调压变压器变比以及各无功补偿装置的出力为调节手段, 来达到改善系统潮流和降低有功损耗并保障各节点电压在

允许范围。而求解该类多目标无功优化问题的现代启发式方法主要如遗传算法<sup>[4]</sup>、免疫算法<sup>[5]</sup>、蚁群算法<sup>[6]</sup>、搜索禁忌算法<sup>[7]</sup>、粒子群算法<sup>[8]</sup>、模拟退火算法<sup>[9]</sup>等, 且都取得了一定的成果。

免疫遗传算法(Immunity Genetic Algorithm, IGA)融合了免疫算法和遗传算法各自的特点<sup>[10-12]</sup>, 具有收敛速度快以及寻优能力强的优点, 已应用到电力系统电压无功优化研究领域并进行了诸多改进。文献[13-14]提出了基于 IGA 的多目标无功优化算法, 对 IGA 在电压无功优化领域中的具体实现方

**基金项目:** 国家自然科学基金(50807041); 武汉市科技攻关计划(2013060501010164); 武汉市青年科技晨光计划(2013070104010010)资助项目

法进行了详细探讨, 并用 IEEE 标准系统算例验证了方法的有效性。文献[9]将模糊逻辑和模拟退火引入到 IGA 当中, 用模拟退火思想指导选择操作, 用模糊逻辑调节交叉和变异算子, 这种改进方法有利于算法的寻优效率。文献[15]利用 IGA 对某实际电网进行无功优化计算, 并与 SGA 的计算结果进行对比, 验证了 IGA 相对于 SGA 的优越性。文献[16]引入相似性矢量距对算法中选择操作进行改进, 对抗体群的相似度和浓度进行调节, 对算法的计算速度和优化效果两个方面都有改进。但以上算法中, 选择概率与种群个体的适应度成正比, 容易导致局部收敛; 常规采取基于相似性矢量距来克服该缺点, 但在求取抗体相似度时, 没有对不同等位基因上的差值进行归一化, 会导致收敛不稳定。

针对以上问题, 本文提出改进 IGA 来进行多目标电压无功优化研究。在编码时采用了实整混合编码形式, 求抗体相似度时进行了归一化处理, 在选择操作时对适应度函数进行了变换, 合理的选择变换系数的值, 可以保证算法在进化前期保持种群多样性, 在进化后期仍能有较快收敛速度, 并在交叉变异时实数段和整数段基因采取不同的措施。取 IEEE-30 节点标准系统为例进行仿真, 验证了所提出的算法较其他算法在计算和收敛能力上具有优势。

## 1 数学模型

本文潮流约束方程、变量约束条件与文献[5,16]一致。采取的优化目标是在电网各节点电压不越限、各发电机无功出力不超出限值的条件下, 全网的总网损最小。对多目标选用线性加权和方法, 以罚函数的形式构造目标函数, 可描述为

$$\min F = P_{\text{Loss}} + \lambda_v \sum \left( \frac{V_i - V_{il}}{V_{i\max} - V_{i\min}} \right)^2 + \lambda_Q \sum \left( \frac{Q_{Gi} - Q_{Gil}}{Q_{Gi\max} - Q_{Gi\min}} \right)^2$$

$$V_{il} = \begin{cases} V_{i\max}, & V_i > V_{i\max} \\ V_i, & V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ V_{i\min}, & V_i < V_{i\min} \end{cases}$$

$$Q_{Gil} = \begin{cases} Q_{Gi\max}, & Q_{Gi} > Q_{Gi\max} \\ Q_{Gi}, & Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \\ Q_{Gi\min}, & Q_{Gi} < Q_{Gi\min} \end{cases}$$

(1)

目标函数中第 2 项和第 3 项分别为对系统 PQ

节点电压越限的惩罚项和对 PV 节点电源无功出力越限的惩罚项。 $\lambda_v$  和  $\lambda_Q$  为对应的惩罚系数, 其取值可以根据经验及实验观察来确定。

## 2 IGA 在电压无功优化中的实现

### 2.1 抗体的编码和解码

为了与实际运行情况相符, 同时提高编码、解码精度, 本文采用混合编码方式: 分接头位置  $T_i$  和电容器组组数  $n_{Ci}$  采用整数编码; 发电机端电压  $V_{Gi}$  采用实数编码。抗体形式如下:

$$X = [V_{G1} | T | n_C] = [V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GN_G} | T_1, T_2, \dots, T_{N_T} | n_{C1}, n_{C2}, \dots, n_{CN_C}]$$

解码方式为

$$\begin{cases} V_{Gi} = V_{Gi} \\ k_{Ti} = k_{T_{i0}} + T_i \cdot \text{step}(k_{Ti}) \\ Q_{Ci} = n_{Ci} \cdot \text{step}(Q_{Ci}) \end{cases}$$

式中:  $k_{T_{i0}}$  为变压器最小变比;  $\text{step}(k_{Ti})$ ,  $\text{step}(Q_{Ci})$  分别对应变分接头步长以及电容器组的单步长容量。

与二进制编码方式相比, 采用实数与整数相混合的抗体编码方式, 可以减小搜索空间, 有利于加快收敛速度。

### 2.2 初始抗体的产生

随机产生初始种群, 并将控制变量的取值限制在规定范围内, 可以避免无效抗体的生成。

### 2.3 亲和度评价函数

#### (1) 适应度函数

由于本文是求解目标函数最小值的优化问题, 且目标函数的构造方法保证了其取值大小均大于 0, 因此可将个体的适应度按下式计算, 即

$$\text{fitness}(x_i) = \frac{1}{F(x_i)} = \frac{1}{[P_{\text{Loss}} + \lambda_v \sum \left( \frac{V_i - V_{il}}{V_{i\max} - V_{i\min}} \right)^2 + \lambda_Q \sum \left( \frac{Q_{Gi} - Q_{Gil}}{Q_{Gi\max} - Q_{Gi\min}} \right)^2]}$$

(4)

式中,  $F(x_i)$  为抗体  $x_i$  对应的目标函数值。

每代中最好个体为第 0 个个体, 会被直接遗传为下一代。

#### (2) 抗体-抗原亲和度函数

抗体与抗原的亲和度函数计算公式如下:

$$A(x_i) = \frac{\text{fitness}(x_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} \text{fitness}(x_i)} \quad (5)$$

其中第 0 个个体不参与总适应度和的计算。

### (3) 抗体-抗体亲和力函数

本文采用基于空间矢量距离的亲和力度量方式。由于抗体是混合编码形式和空间矢量距用欧式距离来表示时, 必须对该距离进行归一化。例如端电压编码之间的实数差值小于 0.1, 而分接头位置或者电容器组数编码之间的为整数, 很小的实数之间的差值相对于整数差值通常被忽略了。不同基因上整数之间的差值取值范围不同, 这会使得抗体间表现出来的差异变小, 即使相差很大抗体之间具有相同的抗体浓度, 不利于快速收敛。

抗体  $x_i$  和  $x_j$  的亲和力定义式如下:

$$A(x_i, x_j) = \frac{1}{1+H(x_i, x_j)} \quad (6)$$

其中,  $H(x_i, x_j)$  为欧式空间中抗体  $x_i$ 、 $x_j$  在 2-范数意义下的距离, 即

$$H(x_i, x_j) = \left\{ \sum \left[ \left( \frac{V_{Gi} - V_{Gj}}{V_{Gi\max} - V_{Gi\min}} \right)^2 + \left( \frac{T_i - T_j}{T_{i\max} - T_{i\min}} \right)^2 + \left( \frac{n_{ci} - n_{cj}}{n_{ci\max} - n_{ci\min}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

## 2.4 浓度函数

抗体浓度是指与该抗体相同或相近的抗体在整个抗体群中所占的比例大小, 其公式定义如下:

$$\text{Density}(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} A(x_i, x_j)}{N} \quad (8)$$

## 2.5 抗体选择函数

在基于 IGA 的电压无功优化问题中, 抗体的选择操作结合抗体的适应度和浓度来进行。一般免疫选择函数由抗体的亲和力和浓度组成, 可设为

$$P(x_i) = (1-a) \cdot \frac{A(x_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} A(x_i)} + \frac{a}{\text{Density}(x_i)} \bigg/ \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\text{Density}(x_i)} \quad (9)$$

浓度衰减率  $a$  的取值区间为 (0, 1)。

对适应度函数进行变换, 抗体与抗原亲和度的免疫选择函数为

$$P'(x_i) = (1-a) \cdot \frac{A'(x_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} A'(x_i)} + \frac{a}{\text{Density}(x_i)} \bigg/ \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{\text{Density}(x_i)} \quad (10)$$

$$A'(x_i) = \frac{\text{fitness}l(x_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} \text{fitness}l(x_i)} \quad (11)$$

$$\text{fitness}l(x_i) = 1 / [\text{fitness}(x_i)_{\max} - (1-b)\text{fitness}(x_i)] \quad (12)$$

$$b = c \times \cos^{20} \left( \frac{\pi \cdot k}{2 \cdot k_{\max}} \right) \quad (13)$$

关于浓度衰减率  $a$ , 可按式 (14) 取值。

$$a = 0.8 \times \cos^{20} \left( \frac{\pi \cdot k}{2 \cdot k_{\max}} \right) \quad (14)$$

其中,  $k$  表示当前进化代数,  $k_{\max}$  表示最大进化代数。显然  $a$  是关于迭代次数  $k$  的单调递减函数。在种群进化初期,  $a$  取值较大而  $1-a$  取值较小, 选择概率主要由抗体浓度函数的大小来决定, 这有助于提高抗体群的多样性; 随着种群的进化,  $a$  取值减小而  $1-a$  取值增大, 选择概率主要受抗体亲和力函数影响, 使得亲和力大的抗体更容易被选择, 能加快优化计算的收敛速度。以往经验和大量实验表明,  $a$  的取值范围在 0.35~0.65 较为合适。

$c$  的值使得在进化代数不高时,  $\text{fitness}l(x_i)$  作用不是太明显保持种群的多样性, 而在进化后期, 抗体的适应度都比较大, 不同抗体选择概率大小很接近, 使用改进的选择函数可以改变抗体的选择概率, 放大在适应度上具有微弱优势的抗体的选择概率, 使适应度大的抗体具有显著优势被遗传到下一代, 加快了算法在进化后期的收敛速度。根据大量仿真及经验,  $c$  值取在  $1/\text{fitness}(x_i)$  附近较好。

## 2.6 新抗体的产生

基于综合概率函数进行轮盘赌选择法选择操作之后, 再对抗体执行交叉和变异操作, 以产生新一代种群。

### (1) 交叉操作

#### ① 实型段的交叉操作

随机产生一个数  $p \in [0, 1]$ , 若  $p < p_{c1}$ , 则对抗体  $x_i$  和  $x_j$  进行交叉操作; 反之, 若  $p \geq p_{c1}$ , 则两抗体

不执行交叉运算。对于两交叉抗体的实数段基因, 随机产生  $\alpha, \beta \in [0, 1]$ , 交叉点交叉操作之后的新基因码为

$$\begin{cases} x'_{im} = \alpha x_{im} + (1 - \alpha) x_{jm} \\ x'_{jm} = (1 - \beta) x_{im} + \beta x_{jm} \end{cases} \quad (15)$$

$x_{im}$ 、 $x_{jm}$  分别表示抗体  $x_i$ 、 $x_j$  的第  $m$  位基因码, 上式表明抗体  $x_i$ 、 $x_j$  在第  $m$  位基因码上发生单点交叉操作。按照上式计算出来的新基因码具有很好的分散性, 有利于保证抗体种群的多样性。

### ② 整型段的交叉操作

对抗体的整型段基因, 抗体两两配对之后按下面的方法进行交叉操作:

随机产生一个数  $p \in [0, 1]$ , 若  $p < p_{c2}$ , 则对抗体  $x_i$  和  $x_j$  进行交叉操作; 若  $p \geq p_{c2}$ , 则两抗体不执行交叉运算。新基因码为

$$\begin{cases} x'_{im} = x_{jm} \\ x'_{jm} = x_{im} \end{cases} \quad (16)$$

### (2) 变异操作

与交叉操作类似, 本文在变异操作中引入混合变异算子, 实型段基因和整型段基因分别以不同的变异概率  $p_{m1}$ 、 $p_{m2}$  做变异运算。

## 2.7 终止迭代条件

本文的终止进化条件结合两个方面:

(1) 最大进化代数。如果在最大进化代数以内都没有寻找到问题的最优解, 则选择进化过程中出现的最优个体输出。

(2) 优化判据。优化问题可能在达到最大进化代数之前已经收敛到最优解, 此种情况下, 优化计算应及时跳出迭代。

## 2.8 算法流程图

基于 IGA 的电压无功优化, 就是对网络进行潮流计算和基于 IGA 的无功优化计算的反复迭代过程, 直至寻找到全局最优解。图 1 为基于 IGA 的无功优化计算流程图。

## 3 算例分析

### 3.1 测试系统与初始参数设置

本文选择 IEEE-30 节点标准测试系统进行测试。在不同的资料中, 此标准系统的基本网络参数和运行数据略有差异, 本文中所有的分析均以文献 [17] 提供的数据为准。基准功率取 100 MVA, 基准

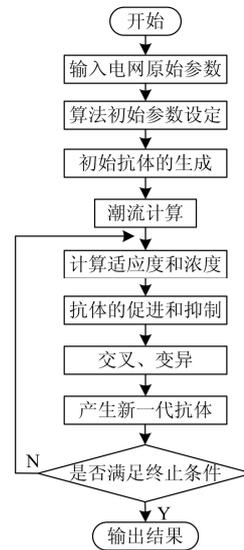


图 1 基于 IGA 的无功优化计算流程图

Fig. 1 Reactive power optimization based on IGA flow calculation

电压取平均电压。为减少初始负荷状态下的系统网损并改善电压质量, 用改进后 IGA 算法对 IEEE-30 节点系统进行优化计算, 算法参数取值设置如下:

种群大小  $N$  取 100, 最大进化代数  $T$  取 200; 遗传操作中染色体实型段和整型段基因的交叉概率  $P_{c1}$  和  $P_{c2}$  均取 0.6, 实型段基因的变异概率  $P_{m1}$  取 0.15, 整型段基因的变异概率  $P_{m2}$  取 0.15; 目标函数中罚系数  $\lambda_r = 6$ ,  $\lambda_o = 4$ 。

### 3.2 优化计算结果及分析

由于 IGA 属于全局概率随机搜索算法, 优化计算时每次的寻优结果可能会有不同, 每种运行方式下各优化算法均计算 20 次, 并对各次的优化结果进行统计。文献 [16] 与本文采用相同的数据来源, 表 1 为分别用 IGA 和文献 [16] 最好一组 IGA1 算法对 IEEE-30 节点系统优化计算所得统计结果。

表 1 不同算法所得的统计数据

Table 1 Result statistics of different algorithms			
	网损最大值/pu	网损最小值/pu	网损平均值/pu
IGA	0.512 9	0.050 76	0.050 84
IGA1	0.052 12	0.051 42	0.051 78

取 IGA 和 IGA1 的 20 次计算结果中的最佳值, 收敛特性曲线如图 2 所示, 变量的值如表 2 所示。

比较表 1 中不同算法的网损值, 本文在进行选择操作时对 IGA 算法的适应度进行变换后, 获得网损比文献 [16] 所提算法 IGA1 小。比较图 2 不同算法的收敛特性图, 可知改进后的算法 IGA 具有更强的

全局搜索能力，能够有效地摆脱局部最优解，并较之 IGA1 在进化后期具有更快收敛速度。

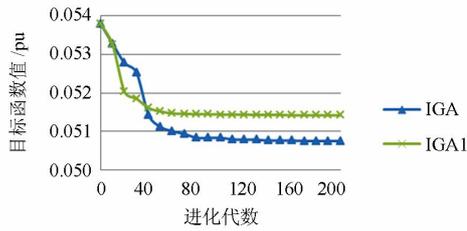


图 2 不同算法的目标函数收敛特性曲线

Fig. 2 Barrier algorithm convergence characteristics of the objective function

表 2 优化计算前后各控制变量的取值

Table 2 Variable values of each control before and after the optimization

变量	初始值	IGA	IGA1
$V_{G1}$	1.050 0	1.050 0	1.050 0
$V_{G2}$	1.045 0	1.045 0	1.046 2
$V_{G5}$	1.010 0	1.010 0	1.029 5
$V_{G8}$	1.010 0	1.022 6	1.037 0
$V_{G11}$	1.050 0	1.050 0	1.027 6
$V_{G13}$	1.050 0	1.050 0	1.045 5
$K_{6-9}$	0.975	1.025	1.00
$K_{6-10}$	0.975	1.025	1.00
$K_{4-12}$	0.925	0.975	1.00
$K_{27-28}$	0.975	0.950	0.975
$B_{C10}$	0.20	0.40	0.20
$B_{C24}$	0.04	0.08	0.10

## 4 结论

本文针对电压无功优化问题提出了一种基于改进算子的免疫遗传算法，在编码时采用了实整混合编码形式，求抗体相似度时进行了归一化处理，在选择操作时对适应度函数进行了变换，合理地选择变换系数的值，可以保证算法在进化前期保持种群多样性，在进化后期仍能有一定的收敛速度，并在交叉变异时实数段和整数段基因采取不同的措施。将本文算法与其他文献进行了对比，对比结果充分说明了改进后的算法既保持了种群的多样性，加强了全局搜索能力，能有效避免局部最优，也对算法的收敛速度有一定程度的提高。

### 参考文献

[1] 缪楠林, 刘明波, 赵维兴, 等. 电力系统动态无功优化并行算法及其实现[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 150-157.

MIAO Nan-lin, LIU Ming-bo, ZHAO Wei-xing, et al. Parallel algorithm of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 150-157.

[2] TOMSOVIC K. A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 287-293.

[3] 李智欢, 李银红, 段献忠. 无功优化多目标模型转换方法的等值线分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 153-160, 174.

LI Zhi-huan, LI Yin-hong, DUAN Xian-zhong. Analysis of objective-converting methods in multi-objective reactive power optimization using contour lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 153-160, 174.

[4] MALACHI Y, SINGER S. A genetic algorithm for the corrective control of voltage and reactive power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 295-300.

[5] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进免疫遗传算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 11-16.

LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing, LI Yun-hua. Reactive power optimization based on improved immunity genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 11-16.

[6] 阮仁俊, 何冰, 孔德诗, 等. 锦标赛蚁群算法在无功优化中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 80-85.

RUAN Ren-jun, HE Bing, KONG De-shi, et al. Research on tournament-based ant colony algorithm for reactive power optimization[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 80-85.

[7] 张聪誉, 陈民铀, 罗辞勇, 等. 基于多目标粒子群算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 153-158.

ZHANG Cong-yu, CHEN Min-you, LUO Ci-yong, et al. Power system reactive power optimization based on multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 153-158.

[8] 曾嘉俊, 刘志刚, 何士玉, 等. 一种基于子区域粒子群的无功优化算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 37-42.

ZENG Jia-jun, LIU Zhi-gang, HE Shi-yu, et al. Study of the reactive power optimization based on sub-region particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 37-42.

[9] 戴雯霞, 吴捷. 无功功率优化的改进退火选择遗传法

- [J]. 电网技术, 2001, 25(11): 33-36.  
DAI Wen-xia, WU Jie. A modified genetic algorithm with annealing selection for reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 33-36.
- [10] BAKIRTZIS A, BISKAS P, ZOUMAS C, et al. Optimal power flow by enhanced genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 229-236.
- [11] HUANG Wei, XU Chun-li, ZHANG Jian-hua, et al. Study of reactive power optimization based on immune genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 186-190.
- [12] LU Gang, TAN De-jian, ZHAO He-ming. Improvement on regulating definition of antibody density of immune algorithm[C] // Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'02), 2002.
- [13] 王秀云, 邹磊, 张迎新, 等. 基于改进免疫遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 1-5.  
WANG Xiu-yun, ZOU Lei, ZHANG Ying-xin, et al. Reactive power optimization of power system based on the improved immune genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 1-5.
- [14] HUANG Wei, XU Chun-li, ZHANG Jian-hua, et al. Study of reactive power optimization based on immune genetic algorithm[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, 7-12 Sept, 2003, 1: 186-190.
- [15] HAO Yuan-zhao, WANG Chao, ZHANG Zhe-nan. Research on reactive power optimization of regional power system based on immune genetic algorithm[C] // 2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), 2013.
- [16] 李玉龙, 宗伟, 吕鲜艳, 等. 基于抗体浓度调节新定义下的免疫遗传算法在电压无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 115-119.  
LI Yu-long, ZONG Wei, Lü Xian-yan, et al. An immune genetic algorithm based on regulating new definition of antibody density for power system reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 115-119.
- [17] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版, 2000.

---

收稿日期: 2014-01-17; 修回日期: 2014-05-28

作者简介:

周攀(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压无功优化、电能质量。E-mail: 909617978@qq.com