

锦标赛蚁群算法在无功优化中的应用研究

阮仁俊, 何冰, 孔德诗, 陈镭

(成都电业局客户服务中心, 四川 成都 610016)

摘要: 无功优化是一个混合整数优化问题, 为了提高算法性能, 提出使用遗传算法中的锦标赛选择机制。在已有的蚁群算法基础上, 通过引入基于编码的蚁群算法, 对不同类型的控制量使用不同的编码长度, 能同时处理连续和离散空间的变量, 再引入遗传算法中的锦标赛选择机制, 锦标赛选择对适应值的非线性变换具有不变性, 能更稳定地控制选择压力, 即使陷入局部最优也具有很高的逃离概率。通过限制信息素上限也能有效防止信息素累积过多。使用 IEEE-14、IEEE-30 和 IEEE-57 系统对算法进行测试, 验证了以上改进的有效性。

关键词: 电力系统; 无功优化; 蚁群算法; 锦标赛选择; 混合整数规划

Research on tournament-based ant colony algorithm for reactive power optimization

RUAN Ren-jun, HE Bing, KONG De-shi, CHEN Lei

(Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610016, China)

Abstract: Reactive power optimization is a mixed integer programming problem. A tournament based selection method from genetic algorithm is proposed to improve the performance of the algorithm. On the basis of the existing ant colony algorithm, an ant colony algorithm based on coding technology is introduced. Different length of code is employed to encode different types of control variables. In this way both continuous and discrete variables can be handled. A tournament based selection method from Genetic Algorithm is reintroduced as the tournament based selection is invariant to nonlinear transform of fitness values, the selection pressure can be easily adjusted and the probability of escaping from local optimum is improved. A limitation strategy of pheromone value is implemented to prevent the values from over-increasing. The proposed algorithm is tested under IEEE-14, IEEE-30 and IEEE-57 systems to show the efficiency of the improvements.

Key words: power system; reactive power optimization; ant colony algorithm; tournament selection; mixed integer programming

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0080-06

0 引言

成都电网是一个典型的受端网络, 负荷中心电压支撑薄弱, 无功缺额较大, 而大量无功的远距离输送, 也势必增加网损, 影响网络供电能力。对电网无功进行优化分析计算, 实现无功优化控制和补偿, 维持系统无功平衡, 是保证该地区电网安全稳定运行的一项关键技术。电力系统无功优化是指系统在一定运行方式下, 以发电机端电压幅值、无功补偿电源容量和可调变压器分接头位置等作为控制变量, 以发电机出力、负荷节点电压幅值和支路输送功率作为状态变量, 应用优化算法^[1], 在满足电力系统无功负荷的需求下, 谋求合理的无功补偿点和最佳补偿容量, 使电力系统安全、经济地向用户供电。

目前已有许多算法被用于求解无功优化问题。包括传统的确定性算法, 如线性规划、牛顿法、内点法等, 以及随即启发式方法, 如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法^[2-3]等。无功优化算法的研究, 主要集中在优化模型的完善以及算法性能改进上。优化模型由最初的只考虑潮流约束以及少数状态量不等式约束, 发展到现在的计及暂态稳定约束考虑多时段综合优化。同时随着优化模型中考虑的因素越来越多, 对算法性能的要求也越来越高。

本文在考虑并联电容器组以及变压器分解头的离散特性基础上, 将无功优化模型建立为混合整数规划问题。由于混合整数规划问题较单纯的组合优化问题和函数优化问题更为复杂, 因此, 还需要对算法进行改进。随机算法性能的优化中一项重要

内容就在于调节算法探索新的解与开发已有解之间的平衡。而对于蚁群算法来说, 选择路径的机制就对该平衡有着重要的影响。借鉴遗传算法的概念, 不同的蚂蚁路径选择规则也存在着不同的选择压力。文献[4-5]已经将遗传算法中的锦标赛选择机制引入到求解组合优化问题的蚁群算法中并用于实际问题的优化。本文则将锦标赛选择引入到基于变长度编码的蚁群算法以便求解无功优化这一混合整数优化问题。

本文以下部分将首先介绍这里使用的无功优化模型^[6-8], 然后直接介绍改进之后的蚁群算法, 最后通过算例来验证本文算法的有效性。

1 无功优化的数学模型

无功优化问题的数学模型可用式(1)描述:

$$\begin{cases} \min f(X,U) \\ \text{s.t. } g(X,U) = 0 \\ h(X,U) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: X 为控制变量, 包括发电机节点电压幅值 V_{Gi} , 无功补偿节点的补偿量 Q_{Ci} , 变压器变比 K_{Ti} ; U 为状态变量, 包括除发电机节点以外的节点电压 V_i , 发电机无功出力 Q_{Gi} ; $f(X,U)$ 为目标函数, 取为有功网损; $g(X,U) = 0$ 为潮流等式约束条件; $h(X,U) \leq 0$ 为状态变量和控制变量的不等式约束条件。

无功优化问题中各式具体意义如下:

目标函数:

$$f(X,U) = \sum_{i=\text{发电机节点}} P_{Gi}(X,U) - \sum_{i=\text{用户节点}} P_{Li} \quad (2)$$

功率约束:

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j \in j} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

变量约束分为控制变量约束和状态变量约束。

控制变量约束条件包括:

$$\begin{aligned} V_{Gi, \min} &\leq V_{Gi} \leq V_{Gi, \max} \\ Q_{Ci} &= Q_{Ci, \min} + n_{Ci} Q_{Ci, \text{step}} \\ (n_{Ci} &= 0, 1, \dots, n_{Ci, \max}) \\ K_{Ti} &= K_{Ti, \min} + n_{Ti} K_{Ti, \text{step}} \\ (n_{Ti} &= 0, 1, \dots, n_{Ti, \max}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $n_{Ci, \max}$ 和 $Q_{Ci, \text{step}}$ 分别为并联电容的最大组数和每组容量; $n_{Ti, \max}$ 和 $K_{Ti, \text{step}}$ 分别为变压器分解头的档位数和每档步长。

状态变量约束条件包括:

$$\begin{aligned} V_{i, \min} &\leq V_i \leq V_{i, \max} \\ Q_{Gi, \min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max} \end{aligned} \quad (5)$$

2 锦标赛蚁群算法

蚁群算法^[9]已被广泛用于组合优化问题的求解, 文献[10]将连续空间的解变量编码为十进制字符串提出了一种求解连续空间优化问题的蚁群算法。为了求解考虑离散控制量的无功优化问题, 本文主要在文献[10]的基础上引入变长度编码和锦标赛选择。同时还对算法做了一些其他细节改进。不同蚁群算法主要在四个部分存在区别: 蚂蚁路径构造图、解的编码方式、路径选择方式、信息素更新方式。限于篇幅, 下面就首先直接介绍这四个部分, 然后再给出完整的算法步骤。

2.1 蚂蚁路径构造图

蚂蚁路径构造图如图 1 所示, 整个图可以分为许多纵列, 每一列包含编号为 0 到 9 的 10 个节点 (即, 通常蚁群算法中所说的城市), 蚂蚁只能从上一列城市向下一列移动。每一列城市被称作一层。最左边的记为第 0 层, 最右边记为第 $l-1$ 层。蚂蚁路径就可以用 l 个十进制数字来表示。

信息素在图上的存储方式也是很重要的一个方面。在通常的蚁群算法中, 信息素保存在两个“城市”之间的连接上 (如图 1 左)。但为了提高处理速度, 本文将采用信息素存放在“城市”上的方法, 即, 图 1 右中的每一个方块上都会保存信息素的浓度。那么, 信息素就可以记为 $\tau_i(j)$, 其中 i 表示层次标号, j 表示具体的十进制数字。

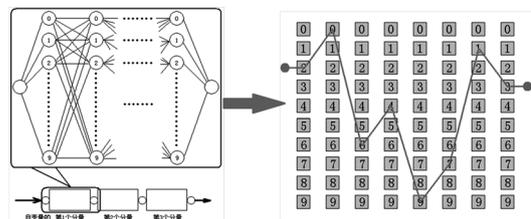


图1 信息素存位于节点上

Fig.1 Pheromones on nodes

2.2 编码方式

假设第 i 个变量使用蚂蚁路径中的第 $\text{start}(i)$ 到第 $\text{end}(i)$ 位数字来表示, 那么可以根据式(6)对蚂蚁路径进行解码。

$$x_i = \sum_{j=\text{start}(i)}^{\text{end}(i)} (d_i * 10^{-j-1}) \quad (6)$$

对不同类型的控制量使用不同的编码长度，从而同时处理连续和离散空间的变量。实际当中变压器是按照已经定好的档位进行离散性调节的，本文直接采用蚂蚁路径中的一位数字对变压器进行编码。公式(6)解码得到的变量在[0, 1)区间上，应用到无功优化问题上时，只需做线性变换转换到需要的区间上即可。

2.3 锦标赛转移规则

2.3.1 传统转移规则

目前大多数蚁群算法都使用基于随机比例选择(即，“轮盘赌”方式)的蚂蚁转移规则。鉴于本文蚂蚁转移规则是在ACS的基础上进行改进的，这里只介绍ACS的蚂蚁转移规则。在ACS中，算法初始化时，所有蚂蚁会被放到起点处，然后每只蚂蚁依次选择下一步移动到哪个数字上。该过程可以用式(7)来表示：

$$S_i = \begin{cases} \underset{j=0,1,\dots,9}{\operatorname{argmax}}(\tau_i(j)), & q \leq q_0 \\ S_{i(\text{rand})}, & q > q_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中： S_i 表示蚂蚁应该在第*i*层选择的节点号码($i=1,$

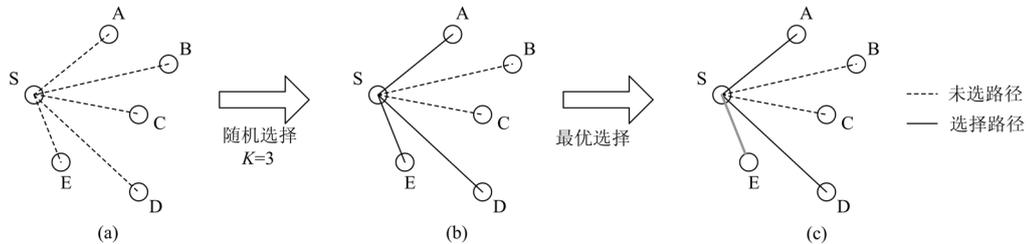


图2 锦标赛选择原理

Fig.2 Tournament selection mechanism

2.4 局部更新规则

在每一只蚂蚁选择了下一步的节点之后，按式(9)修改被选择的节点上的信息素浓度

$$\tau_i(j) \leftarrow (1 - \rho)\tau_i(j) + \rho\tau_0 \quad (9)$$

其中： ρ 是一个[0, 1]区间上的常数，反映了信息素挥发的速度； τ_0 是信息素的初始浓度。

由于信息素的上限对算法逃离局部最优有较大的影响，因此，这里还借鉴MMAS中的方法，限制信息素的上限为 τ_{\max} ，由于这里的局部更新规则已经确保信息素下限为 τ_{\min} 了，因此不再单独处理信息素下限的限制。该过程可用式(10)表示。

$2, \dots, l$); argmax 是一个函数，返回使得 $\tau_i(j)$ 最大的*j*的取值； q_0 为[0, 1]区间上的一个常数； q 是一个每次使用该公式都要重新生成的随机数； $S_{i(\text{rand})}$ 表示每个结点被选中的概率，并由此生成 S_i 。

$$p_i(j) = \frac{\tau_i(j)}{\sum_{k=0}^9 \tau_i(k)} \quad (8)$$

其中： $p_i(j)$ 表示第*i*层第*j*号结点被选中的概率。

根据公式(7)、(8)，就能够以 q_0 的概率直接选择信息素浓度最大的节点，其他情况下，则按照信息素浓度的比例来用“轮盘赌”的方式随机选择节点，在该方式下，信息素浓度越高，被选中的概率也越高。

2.3.2 锦标赛转移规则

锦标赛选择规则^[11]是每只蚂蚁在对下一层进行选择时先随机地在所有*N*条路径中选择*K*条路径，这个选择的个数*K*就叫做竞赛规模($K \leq N$)，然后在选出的路径中选择信息素最大的一个(原理如图2所示(此例中*k=3*))。显然，这种选择方式方便控制选择压力，且选择压力在整个优化过程中不会发生变化，防止了普通的随机比例选择在算法后期个别解总是被选中的现象。

$$\tau_i(j) = \begin{cases} \tau_{\max}, & \tau_i(j) > \tau_{\max} \\ \tau_i(j), & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

2.5 全局更新规则

在评选出最优蚂蚁之后，按式(11)对全局最优蚂蚁所经过的路径进行信息素全局更新

$$\tau_i(j) = \alpha\tau_i(j) + 1/f_{\text{best}} \quad (11)$$

执行全局更新规则之后，也需要按照式(10)对信息素进行修正以防止越限。

2.6 锦标赛蚁群算法步骤

- 1) 初始化，读入电力网络；
- 2) 根据式(7)~(10)为每只蚂蚁构造一条路径并

同时进行信息素局部更新;

3) 根据式(6)解码当前群体, 得到每个自变量的值, 并计算潮流;

4) 计算每只蚂蚁的目标函数值, 评选出全局最优蚂蚁;

5) 根据式(10)、(11)更新全局蚂蚁路径上的信息素;

6) 循环执行步骤 2)~步骤 6), 直到循环次数达到指定次数或多次迭代没有进展;

7) 算法结束, 输出结果。

3 仿真结果及分析

为测试本文算法的性能, 这里使用 IEEE-14、IEEE-30 和 IEEE-57 三个标准系统作为算例。

测试参数如下: 蚂蚁数为 20; 蚁群算法迭代次数为 2 000; 自变量电压幅值精度为 4 位数字; 自变

量并联电容补偿量精度为 1 位数字; 自变量变压器变比精度为 1 位数字; $\alpha=0.8$; $\rho=0.8$; $\tau_0=0.01$; 潮流计算最大允许迭代次数为 20; 潮流计算允许误差为 1×10^{-5} 。

仿真时三个标准系统 IEEE-14 IEEE-30 IEEE-57 参数 k (锦标赛规模) 全取 2, q_0 分别取值 0.6, 0.7, 0.8。控制变量取值范围: 电压 0.9~1.1; 变压器变比 0.9~1.1; 并联电容 0~0.5。状态变量取值范围: 电压 0.9~1.1; 无功出力为以原始数据中的发电机数据为准。

各系统优化结果如表 1 所示, 其中初始网损是按照 IEEE 标准数据中的初始状态计算得到的, 平均网损是执行 20 次计算的平均结果, 最优网损是 20 次计算得到的最好结果, 降损比率是该最好结果与初始网损相比降低的百分比, 越界变量是指状态变量超出允许范围的变量个数。

表 1 无功优化结果
Tab.1 Results of var optimization

系统	控制变量	初始网损	平均网损	最优网损	降损比率	越界变量
IEEE-14	9	0.133 859 16	0.122 908 313 1	0.122 730 494 3	8.31%	0
IEEE-30	12	0.176 333 44	0.160 773 565 6	0.160 316 657 3	9.08%	0
IEEE-57	27	0.278 637 95	0.244 813 826 5	0.231 669 484 4	16.86%	0

从表 1 可以看出, 对于 IEEE-14 系统, 其最优值为 0.122 730 494 3, 降损率为 8.31%, 优于文献[12]中的改进遗传算法 (SAGA) 的最小优化结果 0.132 895 和文献[13]中的伪并行遗传算法 (PPGA) 的最小优化结果 0.123 9, 比文献[14]中提出的广义蚁群算法在考虑收敛条件并加入随机扰动的前提下得到的优化结果 0.122 8 更优, 且以上文献并没有考虑控制量的离均散特性。IEEE-30 系统和 IEEE-57 系统各自的降损率也高达 9.08%和 16.86%, 优化效

果明显。

表 2 是三个系统测试时连续 20 次优化的结果。以 IEEE-14 系统为例, 本算法最大优化结果 0.123 229 232 8 比文献[12] 最小优化结果 0.132 895 和文献[13]最小优化结果 0.123 9 都还要小, 收敛效果非常明显。同时我们很容易直观看出 20 次优化结果都是非常靠近最小值的, 整体平均值更接近最优解, 整个分布中也没有出现平均值较大却让中间有一个最小值作为最优解的畸形结果, 算法十分稳定。

表 2 IEEE14、IEEE30 和 IEEE57 系统 20 次优化结果
Tab.2 Twenty optimization results of IEEE14, IEEE30 and IEEE57 system

14	0.1230489813	0.1229638230	0.1227304943	0.1227453651	0.1227488736	0.1229367553	0.1228467992	0.1231890365	0.1227552376	0.1229480717
	0.1227371800	0.1227351056	0.1229465675	0.1232271630	0.1229641915	0.1227427440	0.1232292328	0.1227408482	0.1227422974	0.1231874953
30	0.1607224700	0.1607463525	0.1607372217	0.1605830901	0.1605850877	0.1603166573	0.1606409255	0.1604820136	0.1610209023	0.1609478517
	0.1605671616	0.1606543943	0.1604644025	0.1606632848	0.1612553764	0.1617845390	0.1606567325	0.1606649633	0.1610210244	0.1609568606
57	0.2400263104	0.2386263787	0.2438843455	0.2403281354	0.2469347276	0.2348709049	0.2616770088	0.2530535687	0.2508995003	0.2375847513
	0.2318638621	0.2316694844	0.2336728672	0.2333035386	0.2655168787	0.2553276827	0.2558657626	0.2442822952	0.2415975682	0.2552909584

IEEE-14、IEEE-30 和 IEEE-57 系统各自最优结果对应的控制变量分别如表 3~表 5 所示, 可以用于

验证。其中的变压器变比是按照 0.02 的步长进行选择, 无功补偿是按照 0.05 的离散值进行选取的。

表 3 IEEE14 系统最优结果的控制变量

Tab.3 Control variables of optimum result for IEEE14 system

控制变量类型	所在位置	具体取值	控制变量类型	所在位置	具体取值
电压	1	1.099 980	变压器变比	4, 7	1.040 000
电压	2	1.085 440	变压器变比	4, 9	0.900 000
电压	3	1.055 660	变压器变比	5, 6	0.980 000
电压	6	1.099 980	无功补偿	9	0.300 000
电压	8	1.071 640			

表 4 IEEE30 系统最优结果的控制变量

Tab.4 Control variables of optimum result for IEEE30 system

控制变量类型	所在位置	具体取值	控制变量类型	所在位置	具体取值
电压	2	1.078 440	变压器变比	4, 12	1.000 000
电压	5	1.038 720	变压器变比	6, 9	1.080 000
电压	8	1.056 300	变压器变比	6, 10	0.980 000
电压	11	1.059 080	变压器变比	27, 28	0.960 000
电压	13	1.088 720	无功补偿	10	0.350 000
电压	30	1.108 400	无功补偿	24	0.150 000

表 5 IEEE57 系统最优结果的控制变量

Tab.5 Control variables of optimum result for IEEE57 system

控制变量类型	所在位置	具体取值	控制变量类型	所在位置	具体取值
电压	2	1.079 980	变压器变比	11, 43	0.960 000
电压	3	1.075 300	变压器变比	13, 49	0.940 000
电压	6	1.068 500	变压器变比	14, 46	0.960 000
电压	8	1.079 960	变压器变比	15, 45	0.980 000
电压	9	1.060 600	变压器变比	20, 21	1.020 000
电压	12	1.083 800	变压器变比	24, 25	1.080 000
电压	57	1.098 880	变压器变比	24, 25	0.960 000
变压器变比	1, 39	0.960 000	变压器变比	24, 26	1.080 000
变压器变比	4, 18	0.960 000	变压器变比	32, 34	0.960 000
变压器变比	4, 18	1.020 000	变压器变比	40, 56	1.000 000
变压器变比	7, 29	1.040 000	无功补偿	18	0.100 000
变压器变比	9, 55	1.040 000	无功补偿	25	0.150 000
变压器变比	10, 51	0.980 000	无功补偿	53	0.150 000
变压器变比	11, 41	0.900 000			

从以上结果已经可以看出，本文介绍的锦标赛蚁群算法求解无功优化问题是可行的、有效的，并且算法的稳定性还有很大的提高。

4 结论

锦标赛蚁群算法在蚂蚁路径选择过程中引入锦标赛选择策略，可以方便控制选择压力，能有效防止局部最优，同时通过对不同控制量使用不同长度的编码，更接近实际情况，也减少了不必要的搜

索。算例结果表明，本文算法性能稳定，能有效地求解无功优化这一类混合整数非线性规划问题。通过本文算法对成都电网的无功配置进行分析，表明对电网无功优化具有一定的借鉴和指导作用。

参考文献

- [1] 潘正君, 等. 演化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [2] Marco Dorigo, Thomas Stützle. 蚁群优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1996, 26 (1): 24-29.
- [4] Tsai Chen-Fa, Tsai Chun-wei, Wu Han-Chang, et al. A novel data clustering approach for data mining in large databases[J]. The Journal of Systems and Software, 2004, 73: 133 - 145.
- [5] Chin Kuan Ho, Yashwant Prasad Singh, Hong Tat Ewe. An enhanced ant colony optimization metaheuristic for the minimum dominating set problem[J]. Applied Artificial Intelligence, 20:881 - 903.
- [6] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on nichegenetic algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.
- [7] 李秀卿, 王涛, 等. 基于蚁群算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 继电器, 2008, 36 (1): 22-26.
LI Xiu-qing, WANG Tao, et al. A hybrid strategy based on ACO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Relay, 2008, 36 (1): 22-26.
- [8] 刘方, 颜伟, Yu C. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 67-72.
LIU Fang, YAN Wei, Yu C. A hybrid strategy based on GA and IPM for optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72.
- [9] 黄挚雄, 张登科, 黎群辉. 蚁群算法及其改进形式综述[J]. 计算技术与自动化, 2006, 25(3): 35-38.
HUANG Zhi-xiong, ZHANG Deng-ke, LI Qun-hui. Ant colony algorithm and summary of its improved algorithms[J]. Computing Technology and Automation, 2006, 25(3): 35-38.
- [10] 陈焯. 用于连续函数优化的蚁群算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(6): 117-120.
CHEN Ye. Ant colony algorithm for continuous function optimization[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2004, 36(6): 117-120.
- [11] 夏桂梅, 曾建潮. 基于锦标赛选择遗传算法的随机微粒群算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(4): 51-53.
XIA Gui-mei, ZENG Jian-chao. Stochastic particle swarm optimization algorithm based on genetic algorithm of tournament selection[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(4): 51-53.
- [12] 张武军, 叶剑锋, 梁伟杰, 等. 基于改进遗传算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 67-71.
ZHANG Wu-jun, YE Jian-feng, LIANG Wei-jie, et al. Multiple-objective reactive power optimization based on improved genetic algorithms[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 67-71.
- [13] 王志华, 尹项根, 李光熹. 伪并行遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 33-36.
WANG Zhi-hua, YIN Xiang-gen, LI Guang-xi. Application of pseudo parallel genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 33-36.
- [14] 林昭华, 侯云鹤, 熊信良, 等. 广义蚁群算法用于电力系统无功优化[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30 (2): 6-9.
LIN Zhao-hua, HOU Yun-he, XIONG Xin-yin, et al. Generalized and colony optimization algorithm for reactive power optimization in power systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30 (2): 6-9.

收稿日期: 2009-01-20; 修回日期: 2010-03-22

作者简介:

阮仁俊 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制、调度自动化; E-mail:51591753@qq.com

何冰 (1974-), 男, 高级工程师, 研究方向为需求侧管理;

孔德诗 (1983-), 男, 硕士, 研究方向为电力工程及能源管理。

(上接第 79 页 continued from page 79)

- HUANG Hai-yue, MIAO Xin, QUAN Xian-jun, et al. Relay protection platform based on elemental and programmable logic[J]. Relay, 2006, 34(14): 11-14.
- [2] 宋小舟, 操丰梅, 等. 基于 IEC61850 功能分层的母线保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(S1): 40-43.
SONG Xiao-zhou, CAO Feng-mei, et al. Study on a scheme of bus protection in substation communication network and system based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(S1): 40-43.

收稿日期: 2009-07-24; 修回日期: 2009-08-20

作者简介:

孙建波 (1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护的研发工作; E-mail:sunjianbo@dongfang-china.com

廖永红 (1972-), 男, 工程师, 主要从事电力系统电网建设工作;

权宪军 (1963-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护的研发管理工作。