

# 基于 Pareto 最优前沿的中压配电网多目标无功优化规划

闫若冰, 唐巍

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 综合考虑中压配电网的技术、经济指标, 以中压配电网安装无功补偿装置的单位投资收益最大和电网有功损耗最小为目标, 构建了多目标混合无功优化模型。根据网损减小量对无功电流的灵敏度分析确定待补偿点集, 利用基于 Pareto 最优前沿的多目标遗传算法优化无功补偿容量, 同时采用精英保留策略、改进的交叉和变异概率策略、自适应编码策略增进算法效率。IEEE33节点和实际工程算例的仿真结果表明, 该方法可以实现对中压配电网的多个技术经济指标的协同优化, 可进一步提高中压配电网无功优化的效率和质量, 证明了此方法的可行性和有效性。

**关键词:** 中压配电网; 无功优化规划; 多目标优化; Pareto 最优前沿; 改进的遗传算法

## Multi-objective reactive power optimization based on the Pareto front in medium-voltage distribution network

YAN Ruo-bing, TANG Wei

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

**Abstract:** Considering the technique and economic index of mid-voltage distribution network integratedly, this paper proposes a new reactive optimization model of medium-voltage distribution network based on the maximizing of unit investment profits of reactive power compensation equipment and minimizing of real power losses. The node sets compensated by capacitors are determined according to the sensitivity analysis of reactive power flow with the decrease of network loss. The Pareto front is adopted to optimize the compensation capacity of reactive power. Improved algorithm efficiency is realized by strategies of elitism preservation, modified crossover operation and mutation adaptive coding. The simulation result of case study on IEEE33 bus shows that the method realizes collaborative optimization of many technical and economic index of mid-voltage distribution network and can furtherly improve the efficiency and quality of its reactive optimization and thus can verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** medium-voltage distribution networks; reactive power planning; multi-objective optimization; Pareto front; improved genetic algorithm

中图分类号: TM731 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0115-05

## 0 引言

中压配电网无功优化规划, 就是在保证供电质量、经济性的前提下, 应用各种数学优化方法, 确定配电线路无功补偿的最佳补偿点及最优补偿量, 是降低配电网损耗、保证供电电压质量的重要措施。作为电网降损节能的重要手段长期以来受到学者和电力企业的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。

常规无功优化问题中多以网损最小<sup>[3-4]</sup>为单一目标函数, 但中压配电网线路条数多、用户数量多, 往往需要考虑无功补偿的经济性, 即无功补偿的投

资效益。因此有必要从降低网损、维持合理的电压水平和提高无功补偿单位投资效益等几方面综合考虑无功优化的经济性和安全性, 建立多目标无功优化的数学模型。对多目标无功优化模型, 通常的处理方法是采用先验知识或偏好系数将多目标问题转化为单目标问题。文献[5-6]利用自适应权重的方法把多目标问题转化为单目标问题, 并进一步通过不断变换权重系数来寻找最优解。但不同性质的目标之间单位不一致, 不易做比较; 权重的选取缺乏科学依据与方法指导。文献[7-8]采用模糊集理论把各目标的隶属度值累加, 优化目标是累加值最大。这种方法解决了多目标之间不同量纲的问题, 但实质仍然是将多目标转化成单目标优化问题进行求解,

**项目基金:** 国家十一五科技支撑计划项目 (2006BAJ04B06)

不能更好地解决多目标同时优化的问题。

针对这些问题, 本文建立了中压配电网的多目标优化数学模型, 提出利用基于 Pareto 最优前沿的改进多目标遗传算法求解中压配电网无功补偿容量。此外, 基于网损减小量对无功电流的灵敏度分析, 提出了根据经济效益最优确定候选解的选择方案。IEEE33<sup>[9]</sup>节点算例和实际配电网算例的仿真结果表明所建模型和算法的有效性。

## 1 多目标无功优化的数学模型

以有功网损  $P_{\text{loss}}$  最小和无功补偿单位投资收益最大为目标建立多目标优化模型:

$$\begin{cases} \min P_{\text{loss}} = \sum_{i \in N, j \in N_i} G_{ij} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}] \\ \max y_{\text{profit}} = \frac{[Slose - \sum_{i \in N, j \in N_i} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij})] T \beta}{K_A \sum_{i=1}^m Q_{ci}} \end{cases} \quad (1)$$

约束条件:

(1) 潮流方程等式约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in N_j} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in N_j} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

(2) 不等式约束: 无功补偿容量  $Q_c$  作为控制变量, 节点电压幅值  $U$  作为状态变量。

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max} & (i = 1, 2, \dots, m) \\ U_{j \min} \leq U_j \leq U_{j \max} & (j = 1, 2, \dots, N) \\ \alpha < \cos \phi < 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p_{\text{loss}}$  为有功网损;  $N$  为电网节点数;  $N_i$  为与节点  $i$  直接相连的所有节点的集合;  $y_{\text{profit}}$  为无功补偿单位投资收益;  $Slose$  为补偿前的网损;  $K_A$  为单位容量电容器的综合造价;  $Q_{ci}$  为节点  $i$  的无功补偿容量;  $m$  为无功补偿节点数;  $T$  为最大负荷损耗小时数;  $\beta$  为电价;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和电压相角;  $Q_{ci \max}$  为节点  $i$  的无功补偿上限;  $U_i$ 、 $U_j$ 、 $U_{j \max}$ 、 $U_{j \min}$  分别为节点  $i$  的电压幅值、节点  $j$  的电压幅值、节点  $j$  的电压允许上下限;  $\cos \phi$  为系统功率因数;  $\alpha$  为系统所要求达到的功率因数下限。在上述无功优化的目标函数中综合考虑了网损最小和无功补偿单位投资收益。

## 2 无功优化的候选补偿点的确定

配电网中总有功损耗  $P_{\text{loss}}$  可以用各支路中有功损耗之和的形式表示。即:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i \quad (4)$$

$$\dot{I}_i = I_{ai} + j I_{ri} \quad (5)$$

式中:  $I_i$  为流过支路  $i$  的总电流;  $R_i$  为支路  $i$  的电阻;  $I_{ai}$  和  $I_{ri}$  分别为流过支路  $i$  的有功电流和无功电流。

将式 (4) 代入式 (5) 得:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N I_{ai}^2 R + \sum_{i=1}^N I_{ri}^2 R_i \quad (6)$$

由式 (6) 可见, 总有功网损有两部分, 即由有功电流流动和无功电流流动所造成的网损。在配电网中, 通常只有一个源节点。无功补偿引起的有功电流在整个优化过程中变化很小, 可以不考虑, 因而无功电流成为优化的主要对象。在配电网中安装并联补偿电容器, 可以减小网络中的无功功率的流动, 从而减小网络的有功损耗, 提高网络各节点运行电压的合格率。

图 1 为一辐射状配电网, 其中某一节点无功负荷的变化只影响从源节点出发到达该节点的各支路上的无功电流的流动, 而其他支路上的无功电流的流动基本不变。

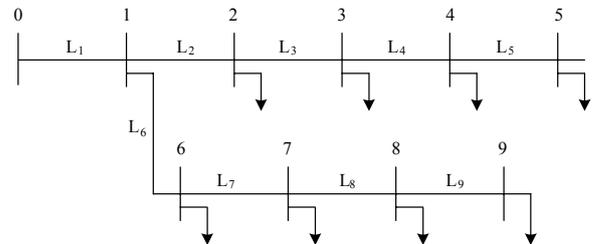


图 1 简单配电网网络图

Fig.1 Single-line diagram of the distribution system

例如节点 7, 其前序支路为  $L_1$ 、 $L_6$ 、 $L_7$ 。因此补偿前, 从源节点到节点  $j$  的无功电流流动引起的有功网损为

$$P_s = \sum_{i \in N_j} I_{ri}^2 R_i \quad N_j = \{L_1, L_6, L_7\} \quad (7)$$

当在节点  $j$  处加装补偿电容后, 设补偿电容器产生的补偿电流为  $I_c$ , 则补偿后从源节点到节点  $j$  的由于无功电流流动所引起的有功网损为:

$$P_s' = \sum_{i \in N_j} (I_{ri} - I_c)^2 R_i \quad (8)$$

节约的有功网损为:

$$\Delta p = p_s - p_s' = \sum_{i \in N_j} (2I_{ri}I_c - I_c^2)R_i \quad (9)$$

求使  $\Delta p$  最大的  $I_c$  的值:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial I_c} = 2 \sum_{i \in N_j} (I_{ri} - I_c)R_i = 0 \quad (10)$$

$$I_c = \frac{\sum_{i \in N_j} I_{ri}R_i}{\sum_{i \in N_j} R_i} = \frac{\sum_{i \in N_j} \Delta U_{ri}}{\sum_{i \in N_j} R_i} \quad (11)$$

基于上述网损减小量对无功电流的灵敏度分析, 给出经济效益确定无功补偿候选点的步骤如下:

Setp1: 对配电网中各节点按  $I_c$  从大到小进行排序, 选出  $I_c$  最大的点进行无功补偿, 补偿容量  $Q = UI_c$ 。

Setp2: 对补偿后的线路进行潮流计算, 进行经济效益分析。

Step3: 如果满足经济要求, 即补偿后减少网损效益大于无功补偿年投资费用, 则重复 Setp1、Setp2, 直至找出所有满足经济要求的无功补偿点。

### 3 基于 Pareto 最优前沿的中压配电网多目标无功优化规划算法

Pareto 最优前沿解是解决多目标优化问题的有效方法, 用于中压配电网无功优化的论文还未见到。本文利用基于 Pareto 最优前沿的多目标遗传算法统一优化中压配电网中杆上补偿点和负荷补偿点的无功补偿容量, 并采用了改进的交叉和变异概率策略、自适应编码方式和精英保留策略。以下是具体步骤:

#### (1) 编码和初始种群的产生

根据配电网补偿电容器容量和组数为整数, 采用十进制整数编码表示各补偿节点的电容补偿量, 如某个体  $i$  的编码为:  $X_i = [C_1, C_2, C_3, \dots, C_m]$ , 其中:  $C_1, C_2$  为杆上补偿点的单组补偿容量倍数;  $C_3, \dots, C_m$  为负荷补偿点的单组补偿容量倍数。然后随机产生  $n_{ind}$  个长度为  $m$  的染色体作为初始种群。计算每个个体的目标函数向量。

#### (2) 多目标无功优化中个体适应度值的确定

基于 Pareto 最优前沿多目标优化中个体适应度的大小是衡量个体优劣的标准, 可根据个体的目标函数向量采用快速非支配性排序和拥挤距离两个步骤来确定个体的适应度值<sup>[10-13]</sup>。假设对种群中每个个体  $i$  已经计算出两个参数: 无支配秩 ( $i_{rank}$ ) 和密度估计值 ( $i_d$ )。根据这两个参数值, 定义比较运算符  $\geq_n$  为:

$$i \geq_n j \text{ if } (i_{rank} < j_{rank}) \text{ or } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_d > j_d)) \quad (12)$$

按照式 (12) 定义, 对于具有不同无支配秩的两个个体, 具有较低无支配秩的个体为优; 对于位于同一无支配前沿中的两个个体, 位于种群密度程度较低处的个体为优。

#### (3) 改进的交叉和变异概率

交叉点选择的基本原则<sup>[14]</sup>是: 在进化初期, 优先选择高位基因作为交叉点; 当进化到后期时 (迭代次数的后期), 由于父代已经接近最优解, 为防止子代偏离父代太远, 应该选择低位基因作为交叉点。交叉点选择概率公式为:

$$p_{cpg} = a + \frac{b}{1 + \exp(\alpha(g - g_0))} \quad (13)$$

$$p_{cpd} = 1 - p_{cpg} \quad (14)$$

式中:  $p_{cpg}$  为高位基因部分的交叉点选择概率;  $p_{cpd}$  为低位基因部分的交叉点选择概率;  $g$  为进化代数;  $a, b, \alpha, g_0$  为常数。

同交叉策略一样, 变异操作通过常数  $k$  将基因串分为高位基因部分和低位基因部分, 其变异概率分别为:

$$p_{mg} = a_1 + \frac{b_1}{1 + \exp(\alpha_1(g - g_0))} \quad (15)$$

$$p_{md} = a_2 + \frac{b_2}{1 + \exp(-\alpha_1(g - g_0))} \quad (16)$$

其中:  $p_{mg}$  为高位基因的变异率;  $p_{md}$  为低位基因的变异率;  $g$  为进化代数;  $a_1, b_1, a_2, b_2, g_0$  均为常数。

#### (4) 精英保留策略

精英策略即保留父代中的优良个体直接进入子代。采用的步骤是: ①将父代  $P_t$  和子代  $Q_t$  全部个体合成为一个种群  $R_t = P_t \cup Q_t$ ,  $R_t$  的个体数为  $2N$ ; ②将种群  $R_t$  快速非支配排序并计算每一个体局部拥挤距离, 依据等级的高低逐一选取个体, 直到个体数量达到  $N$  时就形成了新的父代种群  $P_{t+1}$ ; ③在此基础上开始新一轮的选择、交叉和变异, 形成新的子代种群  $Q_{t+1}$ 。

#### (5) 自适应编码方式

对于中压配电网中的节点, 如果通过遗传算法计算出的补偿容量较小, 可不对该点进行补偿。进而自适应调整个体的编码。

### 4 算例分析

算例中相关参数选取如下： $T=4\ 000\ h$ ， $\beta=0.5$ 元， $K_A=50$ 元/kvar。种群规模为 100，迭代次数为 100 代，电容器单组容量为 10 kvar。基因分段比例为  $k=0.6$ ， $a=0.3$ ， $b=0.4$ ， $\alpha=0.04$ ， $g_0=48$ ， $a_1=0.01$ ， $b_1=0.01$ ， $a_2=0.01$ ， $b_2=0.05$ ， $g'_0=60$ 。

#### 4.1 IEEE33 节点系统算例

配电网接线图如图 2 所示，图 3 显示了初始种群的解空间和进化 100 代后的 Pareto 最优解集。

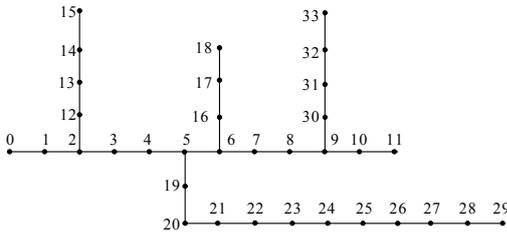
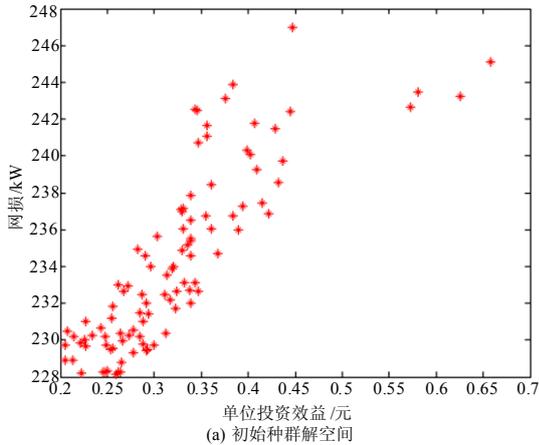
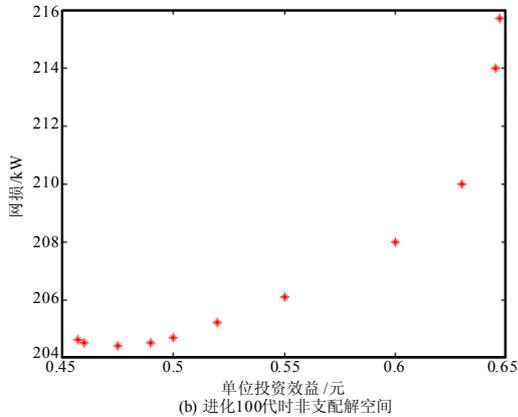


图 2 IEEE 33 节点配电系统结构图

Fig.2 Topological structure for IEEE 33 bus system



(a) 初始种群解空间



(b) 进化 100 代时非支配解空间

图 3 解空间的分布情况

Fig.3 Distribution of objective values

由图 3 可知初始种群中有很多网损较小、单位投资效益较低的解，单位投资效益  $\geq 0.5$  元并且网损  $< 240\ kW$  的解很少。经过本文算法优化后，优化效果明显：Pareto 前沿最优解的网损均在 216 kW 以下，同时单位投资效益  $\geq 0.5$  元的解重复出现多次，并且得到多个 Pareto 前沿最优解供运行人员参考。表 1 是本文算法与文献[15]的算法优化的结果，可见本文算法具有良好的优化效果。

表 1 IEEE 33 算例优化结果

Tab.1 Optimization results of IEEE 33 power system

方法	补偿点	补偿容量/kvar	单位投资收益/元	优化前网损/kW	优化后网损/kW
本文最优折衷解	4	400	0.70	249.5	210.46
	9	1 200			
	24	600			
文献[15]的算法	4	1 025	0.61	249.5	220
	23	600			
	27	300			

#### 4.2 实际工程算例分析

应用本文算法对一个实际 116 节点的 10 kV 配电网系统进行了优化计算。线路拓扑图如图 4 所示。

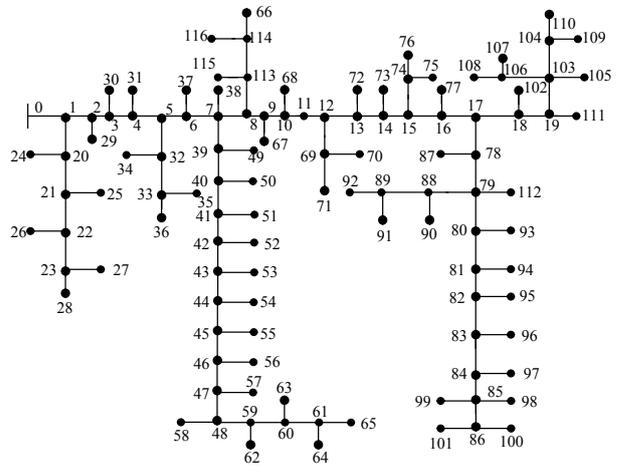


图 4 10 kV 辐射式网络图

Fig.4 10 kV radiation network diagram

此网络中有 75 台配电变压器，总容量为 9 213 kVA，最大运行方式时总有功为 5 016 kW，无功为 2 660 kvar。表 2 是分别以单位投资收益最大和电网有功损耗最小为目标函数进行单目标优化的结果。可见，当一个目标函数达到最小值时，另一个目标函数的值往往较大。

表 2 单目标优化结果

Tab.2 Single objective optimization results

目标函数	补偿节点	补偿容量/ kvar	单位投资收益/元	网损/ kW
补偿前	-	-	-	379.21
单位投资效益最大	8	980	1.01	324.04
	12	1 020		
	73	180		
网损最小	7	1 030	0.89	319.54
	17	1 540		
	68	100		

表 3 是进行多目标优化的结果, 比较多目标和单目标的优化结果可以发现, 多目标优化结果是各单目标优化结果的折中, 能同时考虑两种目标函数的综合最优。

表 3 多目标优化结果

Tab.3 Multi-objective optimization results

算法	补偿节点	补偿容量/ kvar	单位投资收益/元	网损/ kW
多目标优化算法最	7	1 030	0.95	320.56
优折衷解	17	1 200		
	73	240		

## 5 结论

随着对中压配电网运行质量和经济效益要求的日益提高, 进行中压配电网无功优化仅仅考虑网损是不够的, 还要考虑投资效益等多重经济运行指标。本文结合中压配电网的实际要求, 以配电网无功补偿单位投资收益最大和电网有功损耗最小为目标函数, 提出了基于 Pareto 改进的多目标遗传算法进行中压配电网多目标无功优化的思想, 算例仿真结果表明该算法可同时满足投资经济性和配电网运行指标的要求, 具有可行性和有效性。

## 参考文献

[1] 任晓娟, 邓佑满, 赵长城, 等. 高中压配电网动态无功优化算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 31-36.  
REN Xiao-juan, DENG You-man, ZHAO Chang-cheng, et al. Study on the algorithm for dynamic reactive power optimization of distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1): 31-36.

[2] 王伟, 张粒子, 麻秀范. 基于模糊综合评价的结构元中压配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (12): 42-46.  
WANG Wei, ZHANG Li-zi, MA Xiu-fan. Medium-

voltage distribution systems planning with fuzzy comprehensive evaluation and configuration-unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (12): 42-46.

[3] 余畅, 林峰, 刘皓明, 等. 基于序优化禁忌混合算法的配电网无功优化[J]. 继电器, 2008, 36 (6): 20-25.  
YU Chang, LIN Feng, LIU Hao-ming, et al. A novel algorithm for reactive power optimization in distribution grid based on ordinal optimization and tabu search[J]. Relay, 2008, 36 (6): 20-25.

[4] 何建军, 郑霓虹, 王官洁. 基于改进遗传算法的配电网无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14 (3): 17-19.  
HE Jian-jun, ZHENG Ni-hong, WANG Guan-jie. Reactive power optimization based on genetic algorithms in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2002, 14 (3): 17-19.

[5] 夏可青, 赵明奇, 李明. 用于多目标无功优化的自适应遗传算法[J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 55-60.  
XIA Ke-qing, ZHAO Ming-qi, LI Ming. A self-adaptive genetic algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2006, 30 (13): 55-60.

[6] 刘佳, 李丹, 高立群, 等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (31): 22-28.  
LIU Jia, LI Dan, GAO Li-qun, et al. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (31): 22-28.

[7] 熊宁, 陈恳, 戴伟华. 基于禁忌算法的多目标无功优化[J]. 继电器, 2006, 34 (24): 21-25.  
XIONG Ning, CHEN Ken, DAI Wei-hua. Multi-objective optimization based on tabu algorithm[J]. Relay, 2006, 34 (24): 21-25.

[8] 刘述奎, 李奇, 陈维荣, 等. 改进粒子群优化算法在电力系统多目标无功优化中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (11): 31-36.  
LIU Shu-kui, LI Qi, CHEN Wei-rong, et al. Multiobjective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (11): 31-36.

[9] Soliman S A, Moustafa M A, El-Hawary M E. Application of fuzzy logic for reactive-power compensation of radial distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1): 206-213.

[10] Cui Suomin, Mohan Anuraag, Weile Daniel S. Pareto optimal design of absorbers using a parallel elitist nondominated sorting genetic algorithm and the finite element-boundary integral method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53 (6): 2099-2107.

(下转第 123 页 continued on page 123)

## 4 结语

为使电力系统更好地适应未来的实际运行情况, 在进行电力系统无功优化时, 应考虑不确定因素的影响。本文针对电力系统无功优化中的信息不确定问题, 以变动负荷为例, 建立了电力系统不确定性无功优化的双层规划模型, 并采用遗传蚁群融合算法解决了模型求解精度和速度的问题, 最后通过算例进行了有效性的验证。算例结果表明本文的模型和算法有效可行。

### 参考文献

- [1] BARD JF. Practical bi-level optimization algorithms and applications[M]. New York : Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] 王函韵, 胡晔, 朱卫东, 等. 信息不确定性对电网无功优化的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (13): 24-28.  
WANG Han-yun, HU Hua, ZHU Wei-dong, et al. The impact of parameter uncertainty on reactive source optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (13): 24-28.
- [3] GAN D, LUO X, BOURCIER D V, et al. Min-max transfer capability of a transmission interface[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2003, 25: 347-353.
- [4] 周申培. 考虑排放因素的城市交叉口交通信号控制策略的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
ZHOU Shen-pei. Research on traffic signal control strategies in urban intersections based on emission factors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [5] De Jong KA. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. University of Michigan, 1975.
- [6] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning[M]. Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
- [7] Marco Dorigo, Eric Bonabeau, Theraulaz Guy. Ant algorithms and strategy[J]. Future Generation Computer System, 2000, 16 (8): 851-871.
- [8] 丁玉凤, 文劲宇. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化研究[J]. 继电器, 2005, 33 (6): 20-24.  
DING Yu-feng, WEN Jin-yu. Advanced PSO algorithm of reactive power optimization in power system[J]. Relay, 2005, 33 (6): 20-24.
- [9] 黄昌泽, 刘明波, 郝庆苑. 不确定性无功优化问题的双层规划解法[J]. 陕西电力, 2008, 12: 5-9.  
HUANG Chang-ze, LIU Ming-bo, HAO Qing-yuan. Bi-level programming solution considering uncertain factors for reactive power optimization[J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 12: 5-9.
- 收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-04-01  
作者简介:  
周申培 (1979-), 女, 讲师, 博士, 从事智能优化算法, 交通信号控制优化的研究; E-mail: zhousp@whut.edu.cn  
严新平 (1959-), 男, 教授, 博士, 从事智能交通系统的关键技术和算法研究。E-mail: xpyan@whut.edu.cn
- 
- (上接第 119 页 continued from page 119)
- [11] Milošević Borka, Begović Miroslav. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1): 69-75.
- [12] Abido M A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10 (3): 315-329.
- [13] Mendoza Franklin, Bernal-Agustín José L, Domínguez-Navarro José A. NSGA and SPEA applied to multi-objective design of power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (4): 1938-1945.
- [14] 李良敏, 温广瑞, 王生昌. 遗传算法中遗传操作的改进策略[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (6): 27-30.  
LI Liang-min, WEN Guang-rui, WANG Sheng-chang. On modified policy for genetic operations of genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26 (6): 27-30.
- [15] 石嘉川, 刘玉田. 中低压配电网电压优化调整[J]. 中国电力, 2005, 38 (1): 27-30.  
SHI Jia-chuan, LIU Yu-tian. Optimal voltage regulation in middle-low voltage distribution network[J]. Electric Power, 2005, 38 (1): 27-30.
- 
- 收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-03-12  
作者简介:  
闫若冰 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化规划;  
唐巍 (1971-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网经济安全运行、配电网可靠性评估。E-mail: wei\_tang@cau.edu.cn