

基于遗传算法的配电网低压侧 无功补偿动态优化规划

胡海燕¹, 武晓朦^{1,2} 刘 健³

(1. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安理工大学 电气工程系,
陕西 西安 710048; 3. 西安科技大学 电控学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 以投资净收益的折现值最大为目标函数, 将投资规模的限制以惩罚函数的形式加入到目标函数中构成增广目标函数, 将每个可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置作为基因, 基因的取值反映补偿装置安装与否及安装的时间, 在此基础上运用遗传算法获得考虑负荷变化情况下配电网低压侧无功补偿装置的动态最优规划结果。详细讨论了投资规模不加限制、限制总投资规模和限制各个阶段投资规模三种情况的处理方法。对实例的分析表明, 提出的方法是可行的。

关键词: 配电网; 无功优化规划; 动态规划; 遗传算法

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0025-05

0 引言

电力系统无功优化规划(RPP)是电力系统规划的基本内容之一, 目的是在网架规划的基础上, 确定一段时期内新增无功补偿设备的安装位置、容量和安装时间, 以最经济的投资保证系统维持合理的电压水平, 降低系统网损, 提高线路传输能力, 实现系统的安全、经济运行。在变压器低压侧装设可自动投切的低压无功补偿装置实现就地补偿, 不仅可改善配电线路的无功分布, 而且可降低配电变压器的损耗, 并且成本较低, 安装方便, 非常容易实现自动分组投切, 因此是一种最理想的无功补偿方式。

近年来, 在配电网无功优化规划领域已经取得了长足的进展, 文献[1]采用启发式算法求解电容器

的安装位置及其容量大小; 文献[2]将动态优化模型转化成同普通无功优化模型完全相同的表达形式; 文献[3]采用 Bender's 分解技术把无功优化问题分解为投资和运行两个子问题; 文献[4]在无功优化规划中采用模糊集表示多目标和软约束; 文献[5]应用进化算法求解无功优化问题; 文献[6]将 Tabu 搜索用于电力系统无功补偿优化与配置; 文献[7]用动态规划方法求取配电站电容器和有载调压变压器的运行策略; 文献[8]提出了对补偿电容器的分时段优化控制的策略; 文献[9]运用一种启发式简化算法完成了对电容器的控制策略。

但是, 这些研究成果都是主要针对高中压配电网的无功优化规划问题, 没有解决配电网低压侧无功补偿装置布点的优化规划问题。文献[10]研究了配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划, 只是属于单阶段静态规划。

收稿日期: 2004-09-24

本文探讨运用遗传算法求解考虑负荷发展变化情况下,配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的多阶段动态优化规划问题。

1 补偿后减少的损耗电量

对于一个具有 N 个节点的配电网,在变压器 i 处安装了低压侧自动无功补偿装置补偿后,减少的有功网损 ΔP_i 为

$$\Delta P_i = \Delta P_{L,i} + \Delta P_{T,i} \quad (1)$$

式中 $\Delta P_{L,i}$ 为该处上游配电线路减少的有功损耗;

$\Delta P_{T,i}$ 为该配电变压器减少的有功损耗。

$\Delta P_{L,i}$ 可表示为

$$\Delta P_{L,i} = \sum_{j \in \alpha} (I_{j0}^2 - I_j^2) R_{L,j} \quad (2)$$

式中 I_{j0}, I_j 分别为补偿前后流过第 j 条支路的电流; $R_{L,j}$ 为第 k 条线路的电阻, α 为变压器 i 上游支路的集合。

$\Delta P_{T,i}$ 可表示为

$$\Delta P_{T,i} = \Delta P_{T1,i} + \Delta P_{T2,i} \quad (3)$$

式中 $\Delta P_{T1,i}, \Delta P_{T2,i}$ 分别为补偿后变压器 i 减少的负载损耗和空载损耗。

$\Delta P_{T1,i}$ 可表示为

$$\Delta P_{T1,i} = \frac{\Delta P_{k,i} P_i^2}{S_{N,i}^2} \left[\left(\frac{1}{\lambda_{0,i}} \right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_i} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中 $\Delta P_{k,i}, S_{N,i}$ 分别为变压器 i 的短路损耗和额定容量; P_i 为负载 i 的有功功率; $\lambda_{0,i}, \lambda_i$ 分别为补偿前后负载 i 的功率因数。

$\Delta P_{T2,i}$ 可表示为

$$\Delta P_{T2,i} = \frac{\Delta P_{0,i}}{U_N^2} [(U_{0,i})^2 - (U_i)^2] \quad (5)$$

式中 U_N 为额定电压; $U_{0,i}, U_i$ 分别为补偿前、后 i 处的电压。

由于低压侧无功补偿装置可按照负荷无功功率的实际需要量实时地投切电容器组,在电容器组容量选择恰当时,可认为补偿后相应负荷的功率因数 λ_i 可提高到 0.95 以上。实际负荷是变化的,负荷变化情况可用阶梯状的持续负荷曲线描述。考虑负荷变化,在变压器 i 处安装了低压侧自动无功补偿装置补偿后,整个配电网减少损耗电量 ΔA_i 为

$$\Delta A_i = \sum_{m=1}^M \Delta P_{i,m} t_m \quad (6)$$

式中 M 为负荷水平的个数; $\Delta P_{i,m}, t_m$ 分别为负荷 i 的第 m 个负荷水平值及其持续时间。

总的降损收益 B_Σ 为

$$B_\Sigma = \gamma \sum_{i=1}^L \Delta A_i \quad (7)$$

式中 L 为安装低压侧自动无功补偿装置的总数, γ 为单位电量的费用系数(元/kW·h)。

2 基于遗传算法的动态规划方法

采用遗传算法进行低压侧无功补偿装置的动态规划,本节介绍具体的方法。

2.1 染色体编码方案

假设共有 N 个可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置,规划期分为 K 个阶段(一般每个阶段为一年),则染色体共有 N 个基因对应 N 个可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置,每个基因的取值范围为 $0 \sim K$,若基因 i 的取值为 k ,则表示在第 k 年、在第 i 处安装低压侧自动无功补偿装置。若某个基因为 0 则表示相应位置始终不安装低压侧自动无功补偿装置。这样染色体中非 0 基因的总个数为规划期内安装低压侧自动无功补偿装置的总个数。

2.2 适应度计算

以整个规划期内的投资收益率最高为目标函数,投资包括低压侧自动无功补偿装置设备费和安装费,产出为无功补偿后减少的损耗费用,投入和产出都采用资金折现值。根据实际中对各个阶段投资规模的约束,分 3 种情况进行讨论。

2.2.1 不限制规划期总投资

在规划期总投资规模不受限制情况下,以规划期总的投资净收益最大为目标函数,即

$$\text{Object}(X) = \max \left[\sum_{i=1}^K \frac{B_{\Sigma K} - C_K}{(1 + \rho\%)^K} \right] \quad (8)$$

式中 $B_{\Sigma K}, C_K$ 分别为第 K 年的降损收益和投入, $\rho\%$ 为银行利息率。

适应度函数为

$$\text{Fitness}(X) = \text{Object}(X) \quad (9)$$

2.2.2 限制规划期总投资

在限制规划期总投资情况下,以规划期投资净收益最大为目标函数,将低压侧自动无功补偿装置的总个数作为约束条件;也可对低压侧自动无功补偿装置的总个数不加严格限制,而是在目标函数中采用惩罚函数的办法处理,构成增广目标函数,即

$$\text{Object}(X) = \min \left[\sum_{i=1}^K \frac{(1 + \rho\%)^K}{B_{\Sigma K} - C_K} + \lambda \left(\frac{|T - D| - (T - D)}{2} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中 T 为低压侧自动无功补偿装置的预算个数; D 为实际安装的低压侧自动无功补偿装置的个数; λ 为实际安装个数超过预算个数的惩罚因子(一般 λ 取很大)。

适应度函数为

$$\text{Fitness}(X) = 1 / \text{Object}(X) \quad (11)$$

2.2.3 限制每年投资规模

在限制每年投资规模情况下,可以每一阶段(每年)的投资净收益最大为目标函数,并对每一阶段(每年)安装的低压侧自动无功补偿装置的个数都加以约束或在目标函数中采用惩罚函数的办法处理,下一阶段的优化在上一阶段结果的基础上进行。

第 K 阶段(第 K 年)的目标函数表示为

$$\text{Object}(X) = \min \left[\frac{(1 + \rho\%)^K}{B_{\Sigma K} - C_K} + \lambda \left(\frac{|T - D| - (T - D)}{2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

适应度函数与式(11)相同。

2.3 程序框图

遗传操作采用了轮盘赌的方法进行选择 and 复新,采用了单点交叉和基本位变异算子进行群体更新,具体实现步骤不再赘述。算法程序流程见图 1。

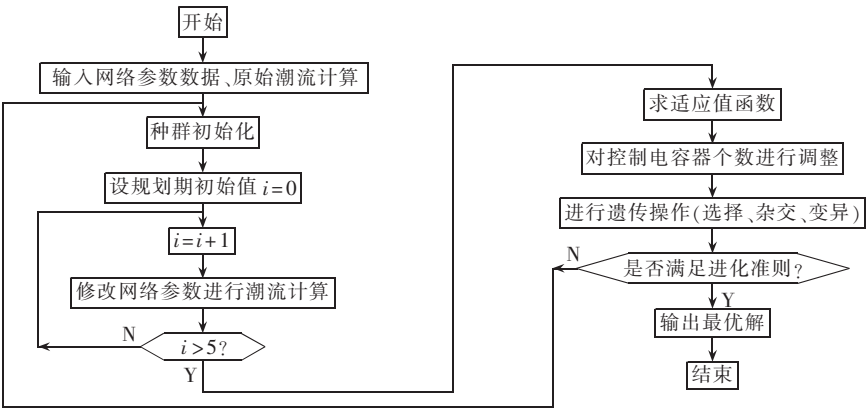


图 1 算法程序流程图
Fig.1 The flowchart of the algorithm

3 实例

采用本文提出的方法对大量配电网的低压侧自动无功补偿装置安装位置进行了动态优化规划,均收到了满意的效果。

对图 2 所示配电网,节点 23 为电源节点,节点 26,28,30 和 31 为开关节点;节点 3,25,27 为 T 接点,节点 2,4,24 和 29 为末梢点;其余节点均为负荷节点,各负荷节点采用的变压器型号和负荷值见表 1。导线采用 LGJ-120,各馈线段长度见表 2。

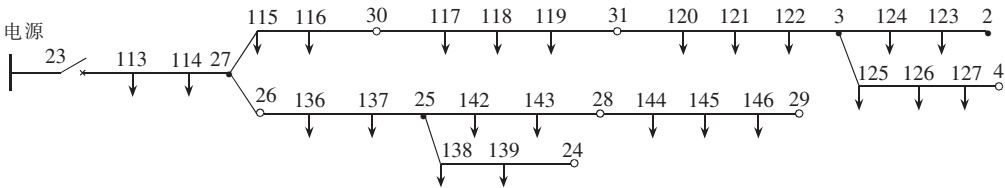


图 2 配电网示意图
Fig.2 The distribution network for calculation

表 1 各节点采用的变压器型号和负荷值
Tab.1 The transformer type and load of each node

负荷节点编号	变压器型号	最小负荷		一般负荷		最大负荷	
		实部/MW	虚部/Mvar	实部/MW	虚部/Mvar	实部/MW	虚部/Mvar
113	SL7-250/10	0.090 2	0.057 9	0.112 8	0.072 4	0.124 1	0.079 6
114	SL7-250/10	0.145 4	0.115 3	0.181 8	0.144 1	0.200 0	0.158 5
136	SL7-250/10	0.015 3	0.011 6	0.019 1	0.014 5	0.021 0	0.016 0
137	SL7-200/10	0.189 4	0.124 0	0.236 8	0.155 0	0.260 5	0.170 5
138	SL7-200/10	0.224 9	0.144 3	0.281 1	0.180 4	0.309 2	0.198 4
139	SL7-100/10	0.150 0	0.110 6	0.187 5	0.138 3	0.206 3	0.152 1
142	SL7-250/10	0.087 0	0.063 9	0.108 8	0.079 9	0.119 7	0.087 9
143	SL7-250/10	0.024 6	0.016 4	0.030 8	0.020 5	0.033 9	0.022 6
144	SL7-200/10	0.239 4	0.151 4	0.299 2	0.189 2	0.329 1	0.208 1
145	SL7-200/10	0.217 6	0.152 3	0.272 0	0.190 4	0.299 2	0.209 4
146	SL7-100/10	0.103 8	0.064 9	0.129 8	0.081 1	0.142 8	0.089 2
115	SL7-250/10	0.245 4	0.156 9	0.306 7	0.196 1	0.337 4	0.215 7
116	SL7-315/10	0.082 5	0.059 3	0.103 1	0.074 1	0.113 4	0.081 5
117	SL7-315/10	0.050 4	0.032 5	0.063 0	0.040 6	0.069 3	0.044 7
118	SL7-160/10	0.158 2	0.098 5	0.197 8	0.123 1	0.217 6	0.135 4
119	SL7-250/10	0.162 0	0.108 9	0.202 5	0.136 1	0.222 8	0.149 7
120	SL7-100/10	0.105 1	0.079 8	0.131 4	0.099 8	0.144 5	0.109 8
121	SL7-315/10	0.124 4	0.081 7	0.155 5	0.102 1	0.171 1	0.112 3
122	SL7-315/10	0.109 4	0.780 5	0.136 8	0.975 6	0.150 5	1.073 2
124	SL7-315/10	0.047 1	0.035 8	0.058 9	0.044 8	0.064 8	0.049 3
123	SL7-315/10	0.014 6	0.009 8	0.018 3	0.012 2	0.020 1	0.013 4
125	SL7-315/10	0.097 0	0.063 5	0.121 3	0.079 4	0.133 4	0.087 3
126	SL7-315/10	0.144 2	0.118 1	0.180 3	0.147 6	0.198 3	0.162 4
127	SL7-315/10	0.029 6	0.019 0	0.037 0	0.023 8	0.040 7	0.026 2

表 2 各支路长度
Tab.2 The length of each branch

									km		
起始节点	终止节点	长度	起始节点	终止节点	长度	起始节点	终止节点	长度	起始节点	终止节点	长度
23	113	0.90	139	24	0.15	115	116	0.60	122	3	0.85
113	114	0.20	25	142	0.65	116	30	0.35	3	124	0.25
114	27	0.40	142	143	0.50	30	117	0.25	124	123	0.90
27	26	0.35	143	28	0.45	117	118	0.50	123	2	0.55
26	136	0.85	28	144	1.15	118	119	0.50	3	125	0.40
136	137	0.15	144	145	0.25	119	31	0.20	125	126	0.20
137	25	0.90	145	146	0.95	31	120	0.65	126	127	0.90
25	138	0.95	146	29	1.35	120	121	0.25	126	127	0.90
138	139	0.75	27	115	0.80	121	122	1.20	127	4	0.65

显然,可以安装低压侧自动无功补偿装置的位置分别为:节点 113~127,136~139,142~146,共 24 处,即染色体长度为 24。

设低压侧自动无功补偿装置的预算个数 T ,惩罚因子 $\lambda=10\,000$,每台低压侧自动无功补偿装置的设备费与安装费之和为 1×10^4 元, $\gamma=0.5$ 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$,规划期为 5 年,分为 5 个规划阶段,每个阶段为一年,补偿后负荷的功率因数达到 0.96。利用年持续负荷曲线,假设把一年中连续变化的实际负荷,分为最大、一般、最小 3 个负荷水平段(如表 3 所示),规划第 1 年中负荷的详细数据如表 1 所示;根据负荷预测结果,假设年负荷变化率如表 4 所示。

选取种群规模为 80,终止迭代次数根据情况设定,收敛精度为 0.000 01,交叉率为 0.5,变异率为 0.01,最终获得的优化规划结果分别如表 5~7 所示。

表 3 负荷水平段
Tab.3 The load levels

负荷	S	t/h
最小负荷	0.8	1 000
一般负荷	1.0	6 760
最大负荷	1.1	1 000

注: S 为负荷水平率; t 为持续运行时间。

表 7 对规划期总的投资加以限制规划结果
Tab.7 The results of planning with total investment limitation

限制总投资 / 10^4 元	无功补偿装置安装个数							总净收益 / 10^4 元
	约束	实际	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年	
6	6	6	4	2	0	0	0	22.08
7	7	7	2	3	0	0	2	3.87
8	8	7	1	2	1	0	3	4.00
9	9	8	2	4	1	0	1	2.91
10	10	10	7	0	2	0	1	27.44
11	11	10	8	1	1	0	0	29.21
12	12	11	6	1	3	1	0	27.71
13	13	13	3	2	4	3	1	4.24
14	14	14	3	3	1	3	4	3.06

由表 5~7 可见,对于该算例,对规划期总的投资不加以限制时,总净收益最大,为 29.35×10^4 元;对规划期总的投资加以限制时,总净收益较大,为 29.21×10^4 元;对规划期每个规划阶段的投资加以限制时,总净收益较小,为 10.44×10^4 元。

表 4 负荷年度比率

Tab.4 The annual load variation rate

规划年	负荷年变化率	规划年	负荷年变化率
第 1 年	1.00	第 4 年	1.03
第 2 年	0.95		
第 3 年	0.98		
		第 5 年	1.10

表 5 对投资规模不加以限制时的规划结果

Tab.5 The results of planning without total investment limitation

遗传迭代次数	最优总个数	总净收益 / 10^4 元	无功补偿装置安装个数				
			第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年
100	15	28.81	8	1	0	2	4
140	13	29.32	9	1	0	0	3
180	14	29.35	9	1	0	0	4

表 6 对规划期每个阶段的投资都加以限制的规划结果

Tab.6 The results of planning with phase investment limitation

规划年	限制投资 / 10^4 元	无功补偿装置安装个数			总净收益 / 10^4 元
		约束	实际	实际总	
第 1 年	8	8	8	10	10.44
第 2 年	1	1	1		
第 3 年	1	1	1		
第 4 年	0	0	0		
第 5 年	0	0	0		

4 结论

以投资净收益最大为目标函数,并将投资规模的限制作为惩罚函数构成增广目标函数,将每个可能安装低压侧自动无功补偿装置的位置作为基因,

基因的取值反映补偿装置安装与否及安装的时间,在此基础上运用遗传算法可以实现配电网低压侧无功补偿装置的动态最优规划。

参考文献:

- [1] LEBOW W M, ROUHANJ R, NADIRA R, *et al.* A hierarchical approach to VAR optimal reactive in system planning[J]. **IEEE Trans. on PAS**, 1998, 104(8): 2051–2057.
- [2] 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.
- [3] 王成山, 唐晓莉, 余贻鑫, 等. 基于启发式算法和 Bender's 分解的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 14–17.
WANG Cheng-shan, TANG Xiao-li, YU Yi-xin, *et al.* Application of benders decomposition based on a hierarchical programming in reactive power planning[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1998, 22(11): 14–17.
- [4] 陈星莺, 钱 锋, 杨素琴. 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 68–71.
CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin. Application of fuzzy dynamic programming approach to optimal reactive control in distribution system technology[J]. **Power System Technology**, 2003, 27(2): 68–71.
- [5] LAI L L. Application of evolutionary programming to reactive power planning-comparison with nonlinear programming approach [J]. **IEEE Trans. on PS**, 1997, 12(1): 198–206.
- [6] HUANG Y C, YANG H T, HUANG C L. Solving the capacitor placement problem using tabu search approach [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1996, 11(4): 1868–1873.
- [7] LU F C, HSU Y Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming[J]. **IEEE Proc.-C**, 1995, 142(6): 639–645.
- [8] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(4): 45–49.
HU Ze-chun, WANG Xi-fan. Time-interval based control strategy of reactive power optimization in distribution networks[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**, 2002, 36(4): 45–49.
- [9] 张 鹏, 刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4): 51–53.
ZHANG Peng, LIU Yu-tian. A simplified dynamic programming approach to voltage control in distribution systems [J]. **Proceedings of the EPSA**, 1999, 11(4): 51–53.
- [10] 胡海燕, 刘 健. 配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划[J]. 继电器, 2004, 32(19): 21–25.
HU Hai-yan, LIU Jian. Optimal placement of automatic reactive compensation equipments on the low voltage side of distribution transformers[J]. **Relay**, 2004, 32(19): 21–25.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

胡海燕(1979–), 女, 山西灵石人, 硕士研究生, 研究方向为配电网的无功优化(E-mail: huhaiyan229@163.com);

武晓朦(1974–), 女, 陕西渭南人, 博士研究生, 研究方向为配电网优化规划;

刘 健(1967–), 男, 北京人, 教授, 博士, IEEE 高级会员, 博士研究生导师, 研究领域为电力系统自动化, 在国内外刊物发表论文近百篇, 出版著作多部, 多次获得省部级科技进步奖。

Genetic algorithm based optimal dynamic planning of low-voltage side reactive power compensators

HU Hai-yan¹, WU Xiao-meng^{1,2}, LIU Jian³

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The highest investment benefit, which is discounted back to present, is taken as the objective function; the restriction of total investment is considered as penalty functions and an augmented index is thus established; each possible installing location of the ARCE (Automatic Reactive Compensation Equipments) is regarded as a gene; the value of each gene is the installing time of ARCE while zero means no ARCE installed; the genetic algorithm is thus applied to obtain the optimal dynamic planning of ARCEs on the low voltage side of distribution network while considering load change. Three cases are detailed; without total investment limitation, with total investment limitation and phase investment limitation. Results show that the proposed method is feasible.

Key words: distribution system; reactive power planning; dynamic planning; genetic algorithm