

配电线路集中无功补偿优化的改进遗传算法

杨建军¹, 战红¹, 鲁成杰²

(1. 青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

摘要: 根据配电线路集中无功补偿优化的特点, 提出了一种通过动态调整补偿容量上限值避免产生过补偿现象的计算方法, 减少了不可行解的产生。并对遗传算法进行了改进, 采用整数编码, 结合了模拟退火算法, 调整了适应函数, 给出了初温确定方法, 采用了随机多父辈适应函数值加权交叉, 改进了变异操作, 从而提高了算法的计算效率和优化性能。优化算例说明了该方法的有效性。

关键词: 集中无功补偿; 无功优化; 配电网; 改进遗传算法; 过补偿

Improved genetic algorithm for centralized reactive power compensation optimization of distribution line

YANG Jian-jun¹, ZHAN Hong¹, LU Cheng-jie²

(1. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Science, Qingdao 266001, China)

Abstract: Based on the features of centralized reactive power compensation, a computing method of avoiding over compensation through dynamic adjust upper limit value is proposed, the number of infeasible solutions is reduced. In the genetic algorithm, integer code is adopted, simulated annealing algorithm is combined, fitness function is adjusted, the method of determining initial temperature is given, the random parent-number fitness-weighted cross is adopted, and mutation method is improved, which can improve the computational efficiency and optimum performance. Example shows that the algorithm is efficient.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Shandong Province(No.Y2007G48).

Key words: centralized reactive power compensation; reactive power optimization; distribution system; improved genetic algorithm; over compensation

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0047-04

0 引言

通常的配电网无功补偿是在配电线路支线中各低压变压器节点附近进行, 但对于大量分散的变压器, 此方法实施困难, 不便于管理和维护, 设备利用率低。造成配电网的实际补偿效果很难达到预定要求, 使得配电网仍存在较大的降损空间。为了克服上述缺点, 在 10 kV (或 6 kV) 配电线路上实施集中无功补偿已日益迫切, 即将户外并联电容器安装在配电网中架空线路的杆塔上, 以进一步提高配电网运行功率因数, 达到降低网损、提高电压质量的目的^[1]。

无功补偿优化问题是一个带有约束条件的大规模非线性组合优化问题。目前关于无功补偿优化的

研究方法较多, 其中遗传算法也有应用, 但多是对支线的分散无功补偿优化, 因各变压器节点中的无功功率相互之间没有直接联系 (除受电压变化而有微小影响外), 其节点补偿容量约束可根据所带负荷情况确定。而对于配电线路的集中无功补偿则不同, 当在某一线杆节点设置补偿后, 从电源节点到达该节点配电线路上的无功潮流已发生变化, 如果再根据原取值范围进行操作可能造成过补偿, 而在实际操作时, 也无法在算法初期给定各线路节点的补偿范围。文献[1]只研究了配电线路的单点补偿, 且通过逐点试算选出最佳补偿点, 再确定最佳补偿容量, 该算法不适合用于多点补偿的情况。文献[2]中只考虑了系统总补偿容量不超过其上限值, 而没有详细考虑各节点、线路是否过补偿, 计算过程中仍将产生大量不可行解。

本文提出了通过动态调整节点补偿容量上限避

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (Y2007G48)

免系统产生过补偿的方法，大大减少了不可解的产生，同时在求解过程中对遗传算法进行了改进，使其优化性能得到了提高。

1 无功补偿优化数学模型

在考虑网损的基础上，以配电网的年运行费用 f' 最小为目标函数，其数学模型为：

$$\min f' = \beta T(\Delta P_{\Sigma} + \Delta P_c Q_c) + (K_a + K_e) K_c Q_c \quad (1)$$

式中： β 为电价； T 为年运行小时数； ΔP_{Σ} 为补偿后系统线路的总有功损耗； ΔP_c 为单位补偿容量本身的有功损耗； Q_c 为配电网总无功补偿容量； K_a 、 K_e 分别为补偿设备年折旧维修率和投资回收率； K_c 为单位补偿容量设备投资。

不等式约束包括补偿容量约束和节点电压值约束，即

$$Q_{ci \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci \max} \quad i = 1, \dots, n_c \quad (2)$$

$$U_{j \min} \leq U_j \leq U_{j \max} \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

式中： Q_{ci} 、 $Q_{ci \max}$ 、 $Q_{ci \min}$ 分别为节点 i 处的无功补偿容量及其上下限； n_c 为配电线路中可进行集中无功补偿的节点数； U_j 、 $U_{j \max}$ 、 $U_{j \min}$ 分别为节点 j 处的运行电压及其上下限； n 为配电网的节点总数。

计算过程中，补偿容量约束已通过动态调整容量上限的方法使其自动得到满足。利用外部惩罚函数法将原目标函数和剩余约束条件转化为无约束问题，则扩展后的目标函数为：

$$f = f' + M \sum_{j=1}^n \max(0, U_{j \min} - U_j, U_j - U_{j \max}) \quad (4)$$

式中： M 为惩罚因子。

2 补偿容量上下限的确定

因运行配电网为树状网，在本文采用的配电网潮流计算方法^[3]中，对节点进行编号时，电源点为零点，沿电流方向按升序对各节点进行编号，并且通往各节点的线路编号与节点编号一致。最终可形成关联矩阵 E ，各值表示的含义为：当通往节点 i 的负荷功率需流经线路 j 时 $E(i, j) = 1$ ；否则 $E(i, j) = 0$ 。利用关联矩阵 E 便可确定各点的补偿上限。任意节点 k 对应的补偿容量上限 $Q_{ck \max}$ 的确定方法为：

$$Q_{ck \max} = \min_{i \in I_k} Q_i \quad (5)$$

$$I_k = \{j | E(k, j) = 1\} \quad (6)$$

式中： Q_i 为各线路中的无功潮流； I_k 表示从电源节点到节点 k 的线路集合。

如果所求 $Q_{ck \max}$ 小于补偿容量下限 $Q_{ck \min}$ 则不在 k 节点设置补偿，否则进行补偿。

实际补偿时 $Q_{ck \max}$ 、 $Q_{ck \min}$ 均应为单组补偿容量的整数倍，因此最终的 $Q_{ck \max}$ 、 $Q_{ck \min}$ 值应为：

$$Q_{ck \max} = n_{ck \max} Q_{c1} \quad (7)$$

$$Q_{ck \min} = n_{ck \min} Q_{c1} \quad (8)$$

式中： $n_{ck \max}$ 、 $n_{ck \min}$ 分别为 $Q_{ck \max}$ 、 $Q_{ck \min}$ 对应的电容器组数； Q_{c1} 为单组电容器容量。

3 模型求解

3.1 编码

因实际补偿容量均为单组补偿容量的整数倍，因此可以采用整数编码直接表示该整数倍，再通过与单组容量的乘积便可得到各节点的补偿容量。考虑节点有不进行补偿的情况，因此节点 k 处补偿容量可以选择值的集合为 $\{0, n_{ck \min}, n_{ck \min} + 1, \dots, n_{ck \max}\}$ 。

3.2 产生初始种群

随机产生 ps (群体规模) 个长度为 n_c 的染色体作为初始种群。对于某一个初始解的产生方法为：

(1) 把初始配电网中各线路的无功潮流值保存在数组 $Q[i]$ 中，令临时变量 n_i 与可进行集中补偿的节点数量 n_c 相等。

(2) 为了使初始解的分布更加合理，在 n_i 个节点中随机选择一个 k 节点，然后确定该节点的补偿容量，具体方法为：计算出 k 节点的补偿容量上限 $Q_{ck \max}$ ，如果 $Q_{ck \max} \geq Q_{ck \min}$ ，表示该节点可以设置补偿，在集合 $\{0, n_{ck \min}, \dots, n_{ck \max}\}$ 中随机选择一个值作为该节点的整数编码；如果 $Q_{ck \max} < Q_{ck \min}$ ，表示该节点不能设置补偿，该节点的整数编码只能为 0。如果最终该节点的整数编码不为 0，则更新从电源节点到节点 k 流经线路 i 的无功潮流， $Q[i] = Q[i] - E(k, i) Q_k$ ，这样操作后在处理后续其他节点时可以避免过补偿不可行解的产生。

(3) 令 $n_i = n_i - 1$ ，如果 $n_i = 0$ ，该染色体产生完毕，退出循环；否则转 (2) 生成该染色体的其他节点补偿容量值。

3.3 确定适应函数

在遗传算法的优化过程中, 适应函数值 F_i 是指导搜索方向的依据, 目标函数的优化方向需对应适应函数值增加的方向, 同时为了改善遗传算法的优化性能, 对适应函数值进行适当的拉伸是必要的。本文采用如下的变换拉伸方法:

$$F_i = \exp(-f_i/t) \quad (9)$$

式中: t 为与模拟退火算法结合后的温度参数。

3.4 确定初温及退温操作

根据调整后的适应函数, 初温的确定采用以下形式:

$$t_0 = (f_{\min} - f_{\max}) / \ln p_r \quad (10)$$

式中: f_{\min} 、 f_{\max} 为初始种群中最小和最大目标函数值; $p_r \in (0,1)$ 为初始种群中最差状态相对于最优状态的接受概率^[4]。这样确定的初温利用了初始种群的相对性能, 避免了过高或过低的初温对算法计算时间或优化质量的影响。

退温函数选用以下常用形式:

$$t_n = 0.98^{n-1} t_0 \quad (11)$$

3.5 交叉操作

对于整数编码, 当采用常用的两父辈算术交叉时, 如果交叉的两父个体是近亲, 则交叉后产生的新个体基本不变, 这样在问题的解空间上不增加新的解, 减少了群体的多样性, 近亲交叉易引起早熟, 不能达到进化的目的。为了避免上述缺点, 本文采用随机多父辈适应函数值加权交叉^[5] RPFWX (Random Parent-number Fitness-Weighted Cross), 以改善交叉效果, 提高进化速度。

根据种群的整体性能, 交叉率 P_c 的自适应计算公式采用以下形式:

$$P_c = k_1 + k_2 (F_{\max} - F_{\text{avg}}) / (F_{\max} - F_{\min}) \quad (12)$$

式中: k_1 、 k_2 为常数; F_{\max} 、 F_{avg} 、 F_{\min} 分别为当前代进化群体的最大、平均和最小适应函数值。

交叉率为 P_c 时, 交叉将产生 $ps \times P_c$ 个新个体。每一个新个体的生成方法分两步进行: ①在父代种群中随机确定 kc ($2 < kc \leq ps$) 个参与交叉的父代个体, 组成一个集合 I_{kc} , 由这些父代个体共同生成一个子个体; ②根据父代个体适应函数值的大小生成子代个体的基因值, 设 $(ch_1^j, \dots, ch_k^j, \dots, ch_{n_c}^j)$ 为集合 I_{kc} 中的第 j 个父代染色体, $(ch_1^i, \dots, ch_k^i, \dots, ch_{n_c}^i)$ 为新生成的子个体, 其中第 k 位基因值的具体生成方法为:

$$ch_k^i = \text{round} \left(\sum_{j \in I_{kc}} W_j ch_k^j \right) \quad (13)$$

其中:

$$W_j = F_j / \sum_{i \in I_{kc}} F_i \quad (14)$$

式中: round 表示进行四舍五入操作的函数。

交叉后需对各基因值进行判断调整, 如果所求的 ch_k^i 大于此时与其对应的 $n_{ck\max}$, 则令其相等。交叉过程也可能产生小于 $n_{ck\min}$ 的值, 此时保留该值, 并参加后续的遗传操作, 但因其不在节点 k 处补偿容量可选值的集合中, 在计算过程中同样认为该节点没有设置补偿, 即计算时只考虑补偿容量不小于 $n_{ck\min}$ 的节点补偿量。

交叉后用新生成的 $ps \times P_c$ 个新个体替换原种群中较差的旧个体。RPFWX 操作综合了更多父代个体信息, 因而可以获得更好的解空间搜索效率和寻优质量。

3.6 变异操作

随机选择一染色体进行变异, 其自适应变异率 P_m 的计算公式为:

$$P_m = k_3 + k_4 (F_{\max} - F_i) / (F_{\max} - F_{\min}) \quad (15)$$

式中: k_3 、 k_4 为常数。

变异操作时设随机选择某染色体 $(ch_1, \dots, ch_k, \dots, ch_{N_c})$ 的第 k 位基因 ch_k 进行变异, 新的基因值 ch_k'' 为:

$$ch_k'' = \begin{cases} ch_k + \Delta(g, d) & \text{random}=0 \\ ch_k - \Delta(g, d) & \text{random}=1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: random 表示产生 0 或 1 的随机整数; Δ 为一随机扰动量, $\Delta(g, d)$ 的计算方法^[6]为:

$$\Delta(g, d) = \text{round} \left[d \left(1 - R^{(1-g/q)^\beta} \right) \right] \quad (17)$$

式中: d 为 Δ 取值的最大范围; R 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数; g 为遗传速算法运行的当前循环代数; q 为算法终止规则中设定的最大允许循环代数; β 为变化水平参数, 这里取 $\beta=1.5$ 。这样使得变异操作有一定的自适应性, 算法循环初期 g 值较小, 计算出的 Δ 值较大, 产生的变异较大; 而循环末期 g 值较大, 计算出的 Δ 值较小, 产生的变异也较小。

为了保证变异后 k 节点以及受其影响从电源节点到节点 k 之间的各节点补偿容量不超过相应约束范围, d 的取值为:

$$d = \begin{cases} \min\{n_{cj\max} - ch_j | E(k, j) = 1\} & \text{random}=0 \\ ch_k - n_{ck\min} & \text{random}=1 \end{cases} \quad (18)$$

4 实例分析

根据本文改进遗传算法，用 C++ 语言编制了配电线路集中无功补偿优化程序，并以某 6 kV 配电线路为例进行了试算，优化前该配电线路的变电所出口总负荷为 1 705 kVA，功率因数为 0.666，总有功损耗为 85.08 kW，最低节点电压值为 5.568 kV，该系统的干线和支线中共有 17 个线杆节点可以安装补偿电容器。

优化参数选取如下： $\beta=0.5$ 元 / kWh， $T=8640$ h， $K_a=3\%$ ， $K_e=15\%$ ， $K_c=50$ 元 / kvar， $\Delta P_c=0.003$ kW / kvar， $U_{j\min}=5.7$ kV， $Q_{c1}=10$ kvar， $Q_{ck\min}=50$ kvar。

分别采用没有设置避免过补偿措施、无改进操作过程的一般遗传算法和本文的改进遗传算法进行无功补偿优化。两种方法的最终优化结果见表 1。从优化结果中可以看到，本文优化方法的优化性能得到了明显提高。

表 1 一般和改进遗传算法优化结果对比表

Tab.1 Optimal result comparison between GA and IGA

	出口负 荷/kVA	功率 因数	有功损 耗/kW	最低电 压/kV	优化安 装节点 数量	优化补偿 总容量 /kvar	年节省运 行费用/万 元	平均 迭代 次数
一般遗 传算法	1 182	0.936	55.78	5.723	8	820	10.86	125
本文改 进遗传 算法	1 124	0.982	53.01	5.773	10	1 020	11.61	28

5 结论

配电线路集中无功补偿与支线中低压变压器节点附近的分散补偿相比，补偿装置集中、设备利用率高、便于管理和维护。本文采用改进遗传算法对集中无功补偿进行优化，求解过程中提出了根据配电线路的无功潮流动态改变节点补偿容量上限的方法，减少了不可行解的产生，同时对遗传算法进行了改进，使算法具有一定的自适应性，并尽可能地避免了陷入局部最优解的可能性，从而使改进遗传

算法在优化能力、效率和可靠性方面得到了提高。

参考文献

[1] 张勇军, 任震, 廖美英, 等. 10kV 长线路杆上无功优化补偿[J]. 中国电力, 2000, 33 (9): 50-52.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LIAO Mei-ying, et al. Optimal Reactive Compensation on Tower of 10kV Long Distribution Feeder[J]. Electric Power, 2000, 33 (9): 50-52.

[2] Ghost T, Goswami S K, Basu S K. Solving Capacitor Placement Problems in Distribution Systems Using Genetic Algorithms[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27 (4): 429-441.

[3] 王艳松, 王平. 配电网短路故障的新算法[J]. 电网技术, 1999, 23 (6): 8-10.
WANG Yan-song, WANG Ping. New Algorithm for Calculating Distribution System Short-circuit Fault[J]. Power System Technology, 1999, 23 (6): 8-10.

[4] 王凌, 郑大中. 一类改进进化规划及其优化性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38 (1): 8-10.
WANG Ling, ZHENG Da-zhong. A Class of Improved Evolutionary Programming and Its Optimization Performances Analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38 (1): 8-10.

[5] 龚道雄, 阮晓钢. 一种新的交叉操作算子[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40 (6): 7-10.
GONG Dao-xiong, RUAN Xiao-gang. A New Crossover Operator[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40 (6): 7-10.

[6] JUN Li, Michael G P. Complete Design of Fuzzy Systems Using a Real-coded Genetic Algorithm with Imbedded Constraints[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2001, 10 (1): 13-37.

收稿日期: 2009-01-11

作者简介:

杨建军 (1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制在电力系统中的应用、优化算法; E-mail: yjjdem@163.com

战红 (1978-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为电力系统优化与控制;

鲁成杰 (1979-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统检测与控制。