

计及调节次数的变电站动态电压无功优化控制的研究

杨素琴, 韩念杭

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 根据实际变电站电压无功调度的要求, 提出一种计及调节次数的变电站动态电压无功优化控制的新模型。以变压器低压侧母线的电压允许偏差和主变的功率因数为控制目标; 考虑变电站动态电压无功控制中控制设备的开关动作过于频繁, 不但可能增加系统的故障率, 而且会减少设备的使用寿命, 约束条件增加变压器的分接头和并联电容器组的控制开关连续调节的时间间隔。对基本遗传算法的适应度函数、遗传算子等做了改进, 以提高计算效率。仿真算例表明, 该方法可以提高变电站的功率因数, 并减少变电站动态电压无功调度中控制设备的动作次数。

关键词: 变电站; 分接头; 电容器; 调节次数; 动态优化

Dynamic reactive power/voltage optimization control of substation considering the number of switching operations

YANG Su-qin, HAN Nian-hang

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Based on real operation of reactive voltage dispatch in a substation, an effective model for dynamic reactive power/voltage optimization control of substation considering the constraint of the number of switching operations is presented. The optimization objective is to minimize the allowable deviation of secondary voltage and to improve the power factor of main transformer. Considering the control devices operating frequently in dynamic voltage-reactive power optimization control of substation, and because of the probability of increasing the fault rate of power system and decreasing the life of devices, the binding conditions mainly emphasize on automation maximal operating numbers of the on-load tap changer and capacitor between two adjacent time intervals. Meanwhile, in order to enhance computation efficiency, improved genetic algorithm (GA) is used in this paper to change the fitness function and the genetic operator of simple GA. Based on the analysis of the numerical example, the method is effective to improve the power factor of substation, and decrease the operating numbers of the equipment in dynamic reactive power/voltage optimization control of substation.

Key words: substation; tap changer; capacitor; operating numbers; dynamic optimization

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0131-06

0 引言

变电站动态电压无功优化控制是指在电网负荷不断变化的情况下, 通过调节变压器的分接头位置和无功补偿设备的容量, 在满足设备和系统运行约束的基础上, 向用户提供合格的电能, 最大限度减少电网中无功功率的传输, 从而降低网络损耗, 其对电网的安全、经济、稳定运行具有重要的现实意义。

在实际变电站动态电压无功调度中, 由于负荷

的变化和波动, 可能会引起有载调压变压器分接头和并联电容器组的开关动作。当这种动作比较频繁时, 不仅会破坏设备的绝缘水平, 加速设备的老化, 影响其使用寿命, 而且会造成事故隐患, 因此在变电站动态电压无功优化控制过程中, 不仅应该考虑有载调压变压器分接头和并联电容器组的开关在一个调度周期内的总动作次数, 而且应该考虑其相邻两次动作要大于某最小时间间隔。

现有的变电站电压无功优化控制策略主要有以下几种: 工程中常用九区图策略或在此基础上进行改进的方法^[1-3], 其都是基于固定的无功上下限而来, 考虑无功调节对电压的影响及其相互协调关系,

基金项目: 南京工程学院科研基金重点项目 (QKJA2009013)

用于运算分析的信息的分散性、随机性的特点造成控制策略的盲目性和不确定性，表现为设备的频繁动作。基于负荷预测的变电站电压无功控制策略^[4-5]，其准确性依赖于负荷预测的正确性和可行性，所以通过负荷预测获得的控制策略在工程实际应用中难以取得很好的效果。还有一些基于人工智能方法的控制策略受到重视，如专家系统^[6-7]、禁忌搜索法^[8]、遗传算法^[9]等，专家系统法能较好地解决电压无功控制的问题，但这种策略的优劣在很大程度上依赖于知识库质量的高低。而禁忌搜索法尽管搜索速度比较快，但其全局解的质量依赖于初值的好坏；而遗传算法以其具有很强的鲁棒性，全局寻优能力强等优点，能较好地解决无功优化控制问题，但已有的基于遗传算法的变电站电压无功控制策略并没有详细考虑控制设备的频繁动作问题。

本文结合实际变电站电压无功控制的要求来研究变电站动态电压无功优化模型和算法。模型中增加变压器的分接头和并联电容器组的控制开关连续调节的时间间隔的约束。优化算法是对基本遗传算法的适应度函数、遗传算子等改进，不但能有效解决动态电压无功控制中开关频繁动作问题，而且有利于进一步提高其计算速度和改善收敛性。

1 数学模型

假设优化周期为 N 小时，则优化周期内第 i 时段的负荷为 $P_i + jQ_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$)，对于第 i 时段某变电站有 r 台带分接头的变压器，这 r 台变压器应该并列运行，变压器的分接头挡位在实际运行过程中都可表示为 $Tap_r(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$)，低压侧用来进行无功补偿的电容器组有 l 个可投切电容器，设在第 i 时段上第 n 个电容器 C_n ($n = 1, 2, \dots, l$) 的状态为 $C_n(i)$ ，则可定义： $C_n(i) = 1$ ，表示第 i 时段第 n 个电容器是合上的； $C_n(i) = 0$ ，表示第 i 时段第 n 个电容器是断开的。

另外，可以定义此研究系统第 i 时段主变分接头的位置和电容器的状态为：

$$X_i = [Tap_r(i), C_1(i), C_2(i), \dots, C_l(i)] \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$

式中： X_i 表示第 i 时段变压器分接头的挡位和电容器的状态。动态优化过程是求取一系列变压器分接头的位置和电容器的状态取值，使 N 小时内目标函数最优。

例如，如图1所示，某一变电站简单的示意图，研究周期为一天（24 h），则 $N = 24$ 。变电站一台

主变的分接头有5挡，若 $Tap_1(t) = -2$ ，表示第 t 小时变电站主变的分接头挡位位于-2挡；补偿电容器组有 $l = 3$ 个电容器，若 $C_2(t) = 1$ ，表示第 t 小时第2个电容器是合上的； $C_2(t) = 0$ ，表示第 t 小时第2个电容器是断开的。若 $X_t = [-2, 1, 0, 1]$ ，表示第 t 小时变电站主变的挡位为-2挡；3个有电容器的状态分别为： $C_1(t) = 1$ ，合上； $C_2(t) = 0$ ，断开； $C_3(t) = 1$ ，合上。

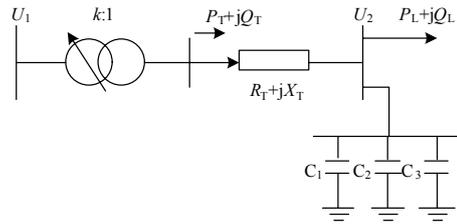


图1 变电站的示意图

Fig.1 Part of a substation

1.1 目标函数

本文从安全性和经济性两方面考虑，选择以变电站二次母线电压允许的偏差和主变功率因数为控制目标。

(1) 安全性目标

维持变电站二次母线电压在规定的范围内，该范围按照调压的要求进行设置，选择变电站二次母线电压与指定值的偏移为控制目标之一。

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^N |U_{2i} - U_{2act}| = \min \sum_{i=1}^N |\Delta U_{2i}| \quad (2)$$

(2) 经济性目标

以往关于变电站电压无功控制的研究较多都选择流过主变无功作为控制目标之一^[4,6]。本文把对无功的评价转化为对功率因数的评价。如果以无功作为控制目标，根据无功投切电容器，特别是允许倒送无功功率的情况下，无法根据有功功率的分量判断是否损耗最小。所以采用功率因数作为控制目标，可以综合反映了有功功率与无功功率，能比较准确地反映损耗。

$$f_2 = \max \sum_{i=1}^N \cos \varphi_i \quad (3)$$

通过合理选择上述两个子目标的权重，可以对安全性和经济性进行全局考虑。

1.2 约束条件

约束条件有等式和不等式约束。

$$f(X_i) = 0 \quad (4)$$

$$U_{2i \min} \leq U_{2i} \leq U_{2i \max} \quad (5)$$

$$\cos \varphi_i \geq p \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^N C_i(t-1) \oplus C_i(t) \leq n_{Qi} \quad (i=1, \dots, l) \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^N Tap_k(t-1) \oplus Tap_k(t) \leq n_{Tk} \quad (k=1, \dots, r) \quad (8)$$

其中: 式(4)为功率平衡方程; 式(5)为变电站低压侧母线的电压约束; 式(6)是主变的功率因数的限制; 式(7)是第*i*个电容器在调度周期*N*时段内允许最大总动作次数 n_{Qi} ; 式(8)是第*k*台变压器分接头在调度周期*N*时段内允许最大总动作次数 n_{Tk} 。本文认为电容器组和变压器分接头开关每调节一次即为动作一次。

考虑到实际的变电站动态电压无功调度过程中, 分接头的频繁调节不利于有载调压变压器的安全运行, 由于有载调压变压器约有80%的故障都是由有载调压分接头引起的, 为了限制分接头在调度周期内连续调节的幅度, 必须限制有载变压器的分接头相邻两次动作大于某一最小间隔时间。

$$\sum_{t=1}^m Tap_k(t-1) \oplus Tap_k(t) \leq 1 \quad m \leq N \quad (9)$$

式中, *m*为变压器分接头开关动作的最小间隔时间。

本文对于同一节点上同容量的电容器采用轮换投切的方法, 使开关的使用几率平均, 避免个别电容器由于频繁动作而降低使用寿命。另外, 考虑在整个调度周期内, 可能会产生前几个时段电容器动作过多, 而后期电容器由于动作次数的限制不再动作, 给电容器的动态调度以及经济运行带来不便。所以增加对于每台电容器相邻两次动作必须大于一定的最小时间间隔。

$$\sum_{t=1}^n C_i(t-1) \oplus C_i(t) \leq 1 \quad n \leq N \quad (10)$$

式中, *n*为每台电容器开关动作的最小间隔时间。

求解式(2)~(10), 可以得到变电站动态电压无功优化控制策略。

2 改进遗传算法

变电站动态电压无功优化控制是一个具有时空复杂性的非线性混合整数优化问题。由于遗传算法具有较强离散变量处理能力, 并能全局寻优, 适合于用遗传算法求解。但是, 在实际应用研究中, 早熟和收敛速度慢是影响基本遗传算法效率的两个主要因素。本文对基本遗传算法适应度函数、遗传算

子等进行了改进。

2.1 适应度函数

在遗传算法中, 适应值是用来区分群体中个体好坏的标准, 是进行自然选择的唯一依据。改变种群内部结构的操作皆通过适应值加以控制。

本文对适应度函数选取, 通过引入隶属度的概念, 主要采用对变电站动态电压无功优化控制模型的目标函数的模糊性, 然后根据模糊判据, 求取目标函数的模糊极大集, 确定目标函数的最优。将二次侧电压的允许偏差和功率因数模糊化^[5]。

(1) 模糊变量 $|\Delta U_{2i}|$ 的隶属度函数(如图2)

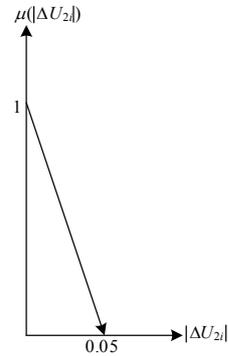


图2 $|\Delta U_{2i}|$ 的隶属度函数

Fig.2 Membership function of $|\Delta U_{2i}|$

表达式为:

$$\mu(|\Delta U_{2i}|) = \begin{cases} 1 - 20|\Delta U_{2i}| & |\Delta U_{2i}| < 0.05 \\ 0 & |\Delta U_{2i}| \geq 0.05 \end{cases} \quad (11)$$

(2) 模糊变量 $\cos \varphi_i$ 的隶属度函数(如图3)

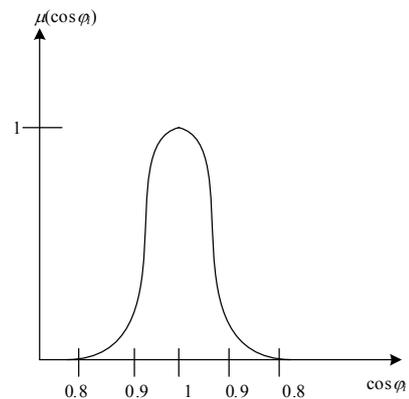


图3 $\cos \varphi_i$ 的隶属度函数

Fig.3 Membership function of $\cos \varphi_i$

表达式为:

$$\mu(\cos \varphi_i) = [1 + (\frac{\cos \varphi_i - 1}{0.05})^4]^{-1} \quad \cos \varphi_i \geq 0 \quad (12)$$

采用隶属度函数概念后, 目标函数转化为适应度函数可以表示为:

$$F = \max[\rho_1 \sum_{i=1}^N \mu(|\Delta U_{2i}|) + \rho_2 \sum_{i=1}^N \mu(\cos \varphi_i)] \quad (13)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 为权重系数, 并且 $\rho_1 + \rho_2 = 1$ 。

采用目标函数的模糊化后, 隶属度函数的和即为适应度函数, 经过如此处理后适应度小于某一门槛值就被淘汰, 大大减少了计算量, 节省计算时间, 加快搜索速度。

2.2 选择算子

选择算子是遗传算法中最能体现自然界“优胜劣汰, 适者生存”的基本规律。选择过程要保证优秀的个体有较大的概率产生新个体, 同时选择方法要保证有较大的寻优范围搜索全局最优解。本文选择操作采用锦标赛选择法与最佳个体保留法相结合, 可以有效避免早熟现象, 提高解的质量。

最佳个体保留法是把种群中适应度最高的个体无条件保留下来而复制到下一代, 其优点是进化过程中某一代的最优解可不被遗传操作破坏。但也有缺点: 局部最优个体的遗传基因急速增加使进化有可能陷入局部解, 而出现早熟现象。

锦标赛选择法在选择时, 从种群中随机地选取 k 个个体, 找出这 k 个个体中适应值最好的个体作为最优个体, 这个最优个体就是下一代种群中的一个个体, 这个过程重复 n 次就产生了新的种群。这里的 k 为竞赛规模, $k > 1$, k 是与群体规模有关的值。这种方法不但使种群在解空间有较好的分散性, 避免早熟, 陷入局部最优; 还能保证入选的个体有较好的适应度。

2.3 交叉和变异算子

在遗传算法的所有操作中, 交叉操作是最重要的操作, 影响着算法的收敛速度和能否收敛到全局最优解。交叉算子的设计包括如何确定交叉点的位置和交叉概率两个方面的内容。

由于交叉点的位置决定了交叉操作的有效性。如果交叉点的位置选择不合适, 可能产生和父代个体一样的子代个体, 导致交叉操作无效, 降低算法的计算效率, 所以首先确定交叉点的有效区域, 然后在该有效区域内随机选择交叉点, 确保交叉操作有效性。

本文交叉点的有效区域确定方法如下^[10]:

设两个不同的个体: $x_i = [g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}]$, $x_j = [g_{j1}, g_{j2}, \dots, g_{jn}]$ 。

如果存在这样的情况:

$$M_{\min} = \min[k \setminus g_{ik} \neq g_{jk}, k = 1, \dots, n]$$

$$M_{\max} = \max[k \setminus g_{ik} \neq g_{jk}, k = 1, \dots, n]$$

则有效交叉区域为 $[M_{\min}, M_{\max}]$ 。

遗传算法的运行参数交叉率 P_c 和变异率 P_m 的大小直接影响算法的收敛性。为了避免选取交叉率与变异率的盲目性, 提高遗传算法的求解效率, 本文根据适应度函数性质在推荐范围内^[11], 采用交叉率与变异率存在最优组合的思想^[12], 选取交叉率和变异率。指导思想是: 在迭代初期, 交叉率应该比较大, 选择与其对应的较小的变异率, 确保计算过程的平稳进行; 在迭代后期, 种群中的个体已趋于稳定, 交叉率应该降低, 选择与其对应的较大的变异率, 以便有机会跳出局部最优; 同时对于适应度值高于群体平均适应度值的个体, 选择较低的交叉率和变异率, 使它得以保护进入下一代; 对于适应度值低于平均适应度的个体, 给予较高的交叉率和变异率, 使之被淘汰。

在交叉和变异操作中, 考虑得到的新个体可能不满足某些约束条件, 如变压器分接头和并联电容器组调节次数的限制, 此时若直接将新个体剔除, 可能满足约束条件的新个体很少, 会降低遗传算法的搜索能力; 如果在将新个体剔除的同时重复生成新个体, 直至生成符合约束条件的新个体, 算法可能时间太长, 甚至陷入死循环。因此, 本文对于重复生成新个体的次数作了限制, 超过一定的次数还未符合约束条件, 则放弃。这样, 既保证了个体的多样性, 又保证了算法的搜索速度。

2.4 最优化原理的应用

在变电站动态电压无功控制的过程中, 在一个调度周期内, 动态调整变压器分接头的位置和并联电容器组状态, 使整个调度周期内目标函数最优。对于调度周期内的最优控制策略, 应该满足最优化原理。

$$F(i) = \max[F(i-1) + f(i)] \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

其中: $F(i)$ 表示调度周期 N 时段内到达第 i 时段累计的适应度函数的最大值; $f(i)$ 表示调度周期 N 时段内第 $i-1$ 时段到第 i 时段的适应度函数值。

2.5 算法的求解步骤

(1) 初始化。输入变电站原始数据, 包括变压器的容量、阻抗、分接头的挡位; 优化时段及该时

段的负荷; 并联电容器组的数量、容量等; 控制变量的个数及各自的取值范围; 遗传算法信息, 包括每代的染色体个数、遗传代数等。

(2) 编码。对各控制变量变压器分接头的档位、并联电容器组的状态采用二进制编码, 产生初始种群。

(3) 解码。将种群中各个个体解码成对应的参数值。

(4) 求适应度。采用前推回代法对解码后的参数进行潮流计算, 求得各个个体的目标函数和适应度函数, 用累加的适应度函数来评价个体。

(5) 判敛: 采用最大遗传代数与本代群体适应值和上代群体适应值比较相结合作为终止进化判据。若收敛, 则输出并记录该时段优化方案以及对应的适应度, 转到步骤(9)。否则, 转到步骤(6)。

(6) 实施选择操作。先采用最佳保留个体法保留染色体适应度最大的个体复制到下一代种群, 然后采用锦标赛选择法, 根据各染色体适应度的大小选择繁殖下一代的母体。

(7) 交叉。首先确定交叉点的有效区域, 两个个体按一定的交叉率进行交叉操作, 然后在该有效区域内随机选择交叉点, 以动态交叉率实施交叉操作。

(8) 变异。个体按照一定的变异率变异, 随机生成每个个体变异点, 根据每个个体的适应值, 确定与动态交叉率最优组合的变异率, 实施变异操作。转到步骤(3)。

(9) 判断一个调度周期内优化是否结束? 若结束, 则根据各时段的策略记录回溯, 可得一个调度周期内一系列的最优控制策略。否则, 转到步骤(2)。

3 算例分析

本文以图 1 所示的 110/10 kV 变电站为例, 部分数据来自文献[4], 主变的容量为 60 MVA, 阻抗为 0.336 (标么值), 分接头共有 5 档; 电容器 C_1 容量为 6 Mvar, 电容器 C_2 和 C_3 容量均为 4 Mvar, 电容器在调度周期内最大允许动作次数为 6 次, 每次动作时间间隔 4 h; 变压器在调度周期内最大允许动作次数为 4 次, 每次动作间隔 5 h; 权重系数 $\rho_1 = \rho_2 = 0.5$ 。在考虑有载变压器的分接头和并联电容器合理的调节次数的前提下, 用改进遗传算法求解变电站动态电压无功优化控制策略。在遗传算法求解过程中, 最大遗传代数 90, 种群规模为 60, 交叉率和变异率根据最优组合动态调整。求解其部分计算结果如表 1。

表 1 不同优化方案的比较

Tab.1 The result comparison of different strategy

优化方案	分接头/次数	C_1 /次数	C_2 /次数	C_3 /次数	平均 U_2	平均 $\cos\varphi$
计及调节次数	4	2	4	2	1.006	0.978
不计调节次数	6	2	6	6	1.008	0.981

表 1 给出在一个调度周期内, 将计及调节次数的方案与未计及调节次数的方案进行比较。结果表明, 在计及调节次数的情况下, 尽管调节效果有一定的降低, 但各控制设备的动作次数明显减少, 使变电站动态电压无功控制在降低调节效果和调节次数之间达到平衡, 降低了变压器的故障率, 均衡了各电容器开关的投切次数, 更符合实际情况。

表 2 基本遗传算法和改进遗传算法结果比较

Tab.2 The result comparison of GA and improved GA

进化代数	10	20	40	60	70	80
GA	11.996	14.989	16.786	17.843	17.943	18.081
改进 GA	14.231	17.078	18.963	19.528	19.539	19.537

表 3 采用改进遗传算法求得最优控制策略

Tab.3 Dynamic optimal dispatching schedules of substation by improved genetic algorithm

小时 n	状态 X_t	变压器二次侧的电压 U_2	功率因数 $\cos\varphi$	适应度 F
1	[2,0,0,0]	1.009	0.968	0.838
2	[2,0,0,0]	1.011	0.947	1.449
3	[2,0,0,0]	1.010	0.937	1.991
4	[2,0,0,0]	1.012	0.931	2.479
5	[2,0,0,0]	1.011	0.922	2.941
6	[2,0,0,0]	1.012	0.926	3.408
7	[1,0,1,0]	1.007	0.985	4.334
8	[1,0,1,0]	0.993	0.995	5.264
9	[1,1,1,0]	0.995	0.998	6.214
10	[1,1,1,0]	1.020	0.989	7.012
11	[1,1,1,0]	1.013	0.996	7.882
12	[2,1,0,0]	1.011	0.997	8.772
13	[2,1,0,1]	1.012	0.995	9.652
14	[2,1,0,1]	1.014	0.992	10.512
15	[2,1,0,1]	1.013	0.997	11.382
16	[2,1,0,1]	1.012	0.997	12.262
17	[1,1,0,0]	1.011	0.993	13.152
18	[1,1,1,0]	0.982	0.99	13.971
19	[1,0,1,0]	0.992	0.998	14.891
20	[1,0,1,0]	1.000	0.997	15.891
21	[1,0,1,0]	1.004	0.999	16.851
22	[2,0,0,0]	0.990	0.989	17.750
23	[2,0,0,0]	1.002	0.979	18.715
24	[2,0,0,0]	1.008	0.965	19.538

表 2 给出了采用简单遗传算法和改进遗传算法的进化代数和适应度值进行比较。结果表明改进遗传算法可以提高算法的效率, 加速收敛, 避免陷入局部最优解。

表 3 给出了迭代第 67 代收敛的最优方案, 从表的数据看出, 分接头和电容器组的动作次数符合实际运行的要求, 调节效果明显。

4 结论

(1) 在考虑变压器分接头和电容器在一个调度周期内允许最大调节次数、连续动作的时间间隔等限制条件的基础上, 本文提出一种变电站动态电压无功优化控制的新模型, 从而避免了调节设备过度频繁动作, 降低由于控制设备频繁动作引起系统故障的可能性。模型合理, 满足变电站电压无功实时调度的要求。

(2) 针对基本遗传算法收敛速度慢、易早熟的缺陷, 对基本遗传算法在适应度函数、遗传算子等方面进行改进。算例结果表明, 本文建议改进遗传算法具有较好的寻优能力和计算效率, 是一种有效而实用的方法。

参考文献

- [1] 罗毅, 涂光瑜, 金燕云, 等. 基于多区图控制策略地区电网电压无功优化控制[J]. 继电器, 2004, 32 (5): 44-48.
LUO Yi, TU Guang-yu, JIN Yan-yun, et al. Control over optimization of voltage and reactive power in regional power network based on multi-region chart control strategy[J]. Relay, 2004, 32 (5): 44-48.
- [2] 熊小伏, 王志勇. 引入负荷预测的变电站电压无功控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 30 (10): 58-60.
XIONG Xiao-fu, WANG Zhi-yong. Control of voltage and reactive power of substation with load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 30 (10): 58-60.
- [3] 朱春明, 刘明波, 裴爱华, 等. 变电站电压无功控制范围的整定计算方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (8): 70-74.
ZHU Chun-ming, LIU Ming-bo, PEI Ai-hua, et al. Setting method for control range of voltage and reactive power in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (8): 70-74.
- [4] Lu F C, Hsu Y Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming[J]. IEE Proc-C, 1995, 142 (6): 639-645.
- [5] Lu F C, Hsu Y Y. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (2): 681-688.
- [6] 刘志超, 陈宏钟, 张伟, 等. 基于专家系统的变电站电压无功控制装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 74-77.
LIU Zhi-chao, CHEN Hong-zhong, ZHANG Wei, et al. Substation voltage and reactive power control device based on expert system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (2): 74-77.
- [7] Hsu Yuanyih, Lu Fengchang. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1998, 13 (4): 1265-1271.
- [8] 任晓莉, 程红丽, 刘健. 基于禁忌搜索算法的变电站电压无功优化控制[J]. 继电器, 2008, 36 (8): 31-34.
REN Xiao-li, CHENG Hong-li, LIU Jian. Voltage and reactive power control based on tabu search algorithm for substations[J]. Relay, 2008, 36 (8): 31-34.
- [9] 李国柱, 王平, 陈星莺. 基于免疫算法的变电站电压无功综合控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (4): 15-18.
LI Guo-zhu, WANG Ping, CHEN Xing-ying. Substation voltage and reactive power control based on IA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (4): 15-18.
- [10] 蔡良伟, 李霞. 遗传算法交叉操作的改进[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 28 (6): 925-928.
CAI Liang-wei, LI Xia. Improvement on crossover operation of genetic algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 28 (6): 925-928.
- [11] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic algorithms-theory application and software realization[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [12] 黎钧琪, 石国桢. 遗传算法交叉率与变异率关系的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 27 (1): 97-99.
LI Jun-qi, SHI Guo-zhen. A study of the relationship of crossover rate and mutation rate in genetic algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 27 (1): 97-99.

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-04-12

作者简介:

杨素琴 (1967-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事电力系统运行与控制、新能源、电力市场等方面的研究与教学工作; E-mail: sqlyang@sina.com.cn

韩念杭 (1957-), 男, 副教授, 主要从事变电站综合自动化、智能电网、数字化变电站等方面的研究与教学工作。