

电力系统无功规划优化的变尺度混沌优化算法

蒋志平^{1,2}, 唐国庆¹

(1. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 南京工程学院电气工程系, 江苏 南京 210013)

摘要: 选择无功设备投资和系统有功网损的综合费用最小作为目标函数, 同时考虑满足电压水平来探讨无功规划优化问题。无功优化前, 首先用模态分析法确定系统的薄弱节点作为候选补偿点, 用电压越限筛选确定最大补偿容量, 然后用无功优化模型决定候选补偿点应加装的无功补偿容量。介绍了变尺度混沌优化算法, 该算法不断缩小优化变量的搜索空间并不断提高搜索精度, 从而有较高的搜索效率。IEEE14节点系统的仿真计算验证了算法的有效性, 算法对初值的敏感性也进行了探讨。

关键词: 电力系统; 无功规划; 模态分析; 变尺度混沌优化算法

Mutative scale chaos optimization algorithm for VAR planning of power system

JIANG Zhi-ping^{1,2}, TANG Guo-qing¹

(1. Dept of Electrical Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Dept of Electrical Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: The cost that integrates investment of reactive equipments with active-power loss of electric power network is selected as objective function. The constraint concerning voltage profile is considered to investigate reactive-power planning problem. Compensation bus is selected firstly by modal analysis method and then maximum size of compensation capacitors is determined by voltage selection, the real size of compensation capacitors is determined by reactive power optimization model lastly. A mutative scale chaos optimization algorithm(MSCOA) is introduced. By continually reducing the searching space of variable optimized and enhancing the searching precision, the algorithm is of high efficiency. MSCOA is applied to reactive power planning of power system incorporating steady state voltage stability constraints and its effectiveness is validated by the simulation result of IEEE 14-bus system. Initial value cannot affect the convergency of MSCOW, and results of optimization almost keep same.

Key words: power system; reactive power planning; modal analysis; mutative scale chaos optimization algorithm

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)02-0033-07

0 引言

电力系统无功规划优化问题是现代电网规划和系统运行所面临的重要研究课题。无功规划优化以保证电力系统的电压质量为前提, 通过调整系统中可调节的无功电源出力或发电机机端电压、有载调压变压器分接头的位置以及在系统薄弱节点合理补偿并联电容器或电抗器组等手段改变系统的潮流分布, 实现系统的经济安全运行。因此, 无功规划优化是一个复杂的非线性、非连续性约束优化问题, 其目标函数难以表达成控制变量的显式函数。当系统规模较大时, 在有限的时间内往往无法完成对解空间的充分搜索, 因而难以求得问题的全局最优解。

无功规划优化问题的传统求解方法有线性规

划法^[1]、非线性规划法^[2]和动态规划法^[20]等, 在计算过程中, 线性规划法需要将问题逐步线性化, 而非线性规划法则需要求解梯度方向, 因此这两种方法的计算过程繁琐、复杂, 且易于陷入局部最优解; 动态规划法在理论上可以得到最优解, 但遇到高维问题时容易陷入维数灾。因此, 用传统方法精确求解无功规划优化问题十分困难。

人工智能优化算法是处理无功规划优化问题的有效方法。遗传算法GA (Genetic Algorithm)^[3]、模拟退火算法SA (Simulated Annealing)^[4]、禁忌搜索TS (Tabu Search) 算法^[5]及粒子群优化PSO (Particle Swarm Optimization)^[6, 7]算法等在处理无功规划优化问题时均具有较好的效果。全局搜索能力是衡量优化算法优劣的关键因素。在这方面, GA 通过变异算子进行基因突变来增加解群的

多样性以保证全局搜索能力,但是过大的变异率容易将搜索到的优良模式结构破坏,导致盲目的随机搜索。SA 算法不对局部最优解进行识别,但可通过Metropolis 接受准则依概率跳出局部最优解,由于其不具备记忆功能,故后续搜索仍有可能回到该局部最优解,造成重复搜索。TS 算法能有效识别局部最优解,且通过强行调整搜索方向跳出局部最优解,并利用Tabu 表来防止重复搜索,但Tabu 算法是单点记忆,记忆效率低下,存在为产生好的禁忌效果而加大Tabu 表规模,导致搜索效率下降的问题。PSO 算法通过粒子个体对历史信息和社会信息的共享使得优化过程迅速收敛,但由于粒子种群快速趋同,因而该方法容易陷入局部极值。

混沌优化算法 COA (Chaos Optimization Algorithm) 是一种新的直接搜索优化算法。它直接采用混沌变量在允许解空间内进行搜索,搜索过程按混沌运动的自身规律进行,与GA和TS等按概率接受“劣解”以跳出局部最优解的算法相比,它更易于摆脱局部最优解,搜索效率高。文献[8~11]将混沌优化技术分别应用于电力系统的经济负荷分配、负荷预测及辨识、最优潮流等领域,取得了良好的效果。但COA存在一个缺陷,即局部搜索效果较差,计算精度不高^[12]。针对这个缺点,变尺度混沌优化算法MSCOA (Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm)^[13]以COA为基础,通过缩小优化变量的搜索区间来实现局部细化搜索,同时通过改变“二次搜索”的调节系数来提高搜索精度。本文将MSCOA应用于电力系统无功规划优化问题的求解,并对IEEE14节点系统进行了仿真计算,计算结果证明了该算法的有效性,最后就算法对初值的敏感性进行了探讨。

1 静态无功补偿源安装位置和最大容量的确定

本文采用模态分析技术和电压越限筛选相结合的方法,选取合适的无功补偿设备安装点以及最大补偿容量。

1.1 静态无功补偿源安装位置的确定

模态分析技术^[14, 15]是利用系统静态模型,计算简化雅可比矩阵^[14]的最小特征值及其特征向量,每一个特征值与电压/无功功率变化模式相关,其大小提供了电压不稳定的相对量度。特征向量用来描述模态,它提供关于网络元件和发电机在每个模式中的参与程度和电压失稳机理的信息。

对较小的特征值,节点参与因子^[14]表明了电力系统易于发生电压失稳的区域。对于给定的模式,节点参与因子的大小指示了在这个节点施加补救措施对稳定该模式的有效性。除了节点参与因子以外,模态分析法还可以计算线路和发电机的参与因子。线路参与因子表明哪条线路对于给定的电压稳定模式而言是重要的,这可以帮助确定可采取的补救措施,以及确定可能导致系统电压失稳的预想事故。同理,发电机参与因子表明为保证给定模态的电压稳定,哪些发电机必须保留无功备用。

由上述特征结构分析法确定的薄弱节点可以作为无功补偿的地点,节点参与因子越大,此点越应该补偿;快速无功备用的关键地点即为关键发电机所在的节点,发电机的参与因子越高越应该提高无功备用水平。

1.2 各无功补偿扩建点最大补偿容量的确定

在无功补偿点确定后,为了降低搜索空间,减少计算时间,避免控制变量在不可行区域(或者不经济)搜索浪费过多的时间,需要对各无功补偿点的最大补偿容量进行限定。确定最大补偿容量的过程在计算潮流的基础上进行。

具体步骤如下:

1) 潮流计算后,对于电压越下限(低于0.95)的节点而言,在该节点逐步增加容性无功补偿容量,直到该节点电压达到下限值(0.95)为止。

2) 对于电压越上限(高于1.05)的节点,也在该节点逐步增加感性无功补偿容量,直到该节点电压达到上限值1.05 为止。

3) 对于那些由于节点参与因子较高而入选,而电压幅值在0.95~1.00 之间的节点,在该节点逐步增加容性无功补偿容量,直到该节点电压幅值达到1.00。

4) 对于那些由于节点参与因子较高而入选,但电压幅值在1.00~1.05 之间的节点,则暂不考虑作为无功补偿点(当然这种节点比较少见)。在选定无功补偿扩建点和各节点的最大补偿容量后,可以变尺度混沌优化方法进行无功补偿的优化规划。

2 无功规划优化的数学模型

选择无功设备投资和系统有功网损的综合费用最小作为目标函数^[16],即

$$\min f = B\tau_{\max} P_{\text{loss}} S_n + \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y} (C Q_c S_i) \quad (1)$$

式中: B 为修正后的有功电价; τ_{\max} 为全网的年最大

负荷利用小时数; T 为补偿设备的使用年限; P_{loss}^N 为正常状态下系统总的有功损耗; r 为待装无功补偿设备的数目; C_i 为第 i 个可能补偿地点补偿设备的经过修正的单位容量的价格; Q_{ci} 为待安装的电容器容量; S_B 为基准功率。

目标函数也可写为:

$$\min f = \alpha P_{\text{loss}}^N + \sum_{i=1}^r (C_i Q_{Ci}) \quad (2)$$

式中: $\alpha = B_{\tau_m} Y$; $f = Y f / S_B$ 。

满足以下等式和不等式约束:

$$P_{Gi} - P_{Di} + \sum_{j \in i} V_i V_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + \sum_{j \in i} V_i V_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max} \quad (5)$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \quad (6)$$

$$t_k^{\min} \leq t_k \leq t_k^{\max} \quad (7)$$

以上各式中: V_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差; G_{ij} 为导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实部; $j \in i$ 表示节点 j 与 i 直接相连; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为连接于节点 i 的发电机的有功和无功出力; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为连接于节点 i 有功和无功负荷需求; $V_i \angle \delta_i$ 为节点 i 的电压向量; $Y_{ij} \angle \theta_{ij}$ 为系统导纳矩阵第 i 行第 j 列元素; t_k 为第 k 台变压器调压分接头; $P_{Gi, \max}$ 、 $P_{Gi, \min}$ 分别为连接于节点 i 的发电机的有功出力上下限; $Q_{Gi, \max}$ 、 $Q_{Gi, \min}$ 分别为连接于节点 i 的发电机的无功出力上下限; t_k^{\max} 、 t_k^{\min} 为第 k 台变压器调压分接头上、下限。

由于发电机端电压、变压器变比和各节点补偿电容器容量是控制变量, 因此其约束可以自身得到满足。PQ 节点电压与无功发电功率是状态变量, 需写成罚函数的形式, 可以由式 (8) 表示

$$F = f + \sum_{i \in N_{ro}} \lambda_{vi} \left(\frac{\Delta V_i}{V_{i, \max} - V_{i, \min}} \right)^2 + \sum_{i \in (N_c + N_c)} \lambda_{ci} \left(\frac{\Delta Q_i}{Q_{i, \max} - Q_{i, \min}} \right)^2 \quad (8)$$

式中: λ_{vi} 和 λ_{ci} 为罚因子; ΔV_i 和 ΔQ_i 可以表示为

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_{i, \max} - V_i; & V_i > V_{i, \max} \\ 0; & V_{i, \min} < V_i < V_{i, \max} \\ V_i - V_{i, \min}; & V_i < V_{i, \min} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta Q_i = \begin{cases} Q_{i, \max} - Q_i; & Q_i > Q_{i, \max} \\ 0; & Q_{i, \min} < Q_i < Q_{i, \max} \\ Q_i - Q_{i, \min}; & Q_i < Q_{i, \min} \end{cases} \quad (10)$$

3 变尺度混沌优化方法

混沌 (Chaos) 是一种较为普遍的非线性现象, 它看似一片混乱的变化过程实际上含有内在的规律性。一个混沌变量在一定范围内有如下特点: 1) 随机性, 即它的表现同随机变量一样杂乱; 2) 遍历性, 即它不重复地历经空间内的所有状态; 3) 规律性, 该变量是由确定的迭代方程导出的。文献 [12] 考虑过用混沌变量进行优化搜索。其基本思想是把混沌变量线性映射到优化变量的取值区间, 然后利用混沌变量进行搜索。混沌优化算法 (COA) 作为一种直接搜索算法其缺点是局部优化效果不理想, 为了增强混沌优化的局部搜索能力, 本文采用变尺度混沌优化算法 (MSCOA), 其特点在于: 1) 根据搜索进程, 不断缩小优化变量的搜索空间; 2) 根据搜索进程, 不断改变“二次搜索”的调节系数。

选择 Logistic 迭代映射函数产生混沌变量^[12]

$$x^{(k+1)} = \mu x^{(k)} (1.0 - x^{(k)}) \quad (11)$$

式中: k 为迭代次数; μ 是一个控制变量, 当 $\mu = 4$ 时系统处于完全混沌状态。若需优化 n 个参数, 则任意设定 (0, 1) 区间 n 个相异的初值 (注意不能为方程 (11) 的不动点 0.25, 0.5, 0.75), 得到 n 个轨迹不同的混沌变量。

对连续对象的全局极小值优化问题

$$\min f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_i \in [a_i, b_i], \quad i=1, 2, \dots, n$$

MSCOA 的步骤^[13]如下 (记 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 $f(x_i)$):

步骤 1 初始化 $k=0, r=0$ 。 $x_i^k = x_i(0)$, $x_i^* = x_i(0)$, $a_i^r = a_i$, $b_i^r = b_i$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。这里 k 为混沌变量迭代标志, r 为细搜索标志, $x_i(0)$ 为 (0, 1) 区

间 n 个相异的初值。 x_i^* 为当前得到的最优混沌变量，当前最优解 f^* 初始化为一个较大的数。

步骤2 把 x_i^k 映射到优化变量取值区间成为 $m x_i^k$

$$m x_i^k = a_i^r + x_i^k \cdot (b_i^r - a_i^r) \quad (12)$$

步骤3 用混沌变量进行优化搜索

若 $f(m x_i^k) < f^*$ ，则 $x_i^* = x_i^k$ ；否则继续。

步骤4 $k := k + 1$ ， $x_i^k := 4 x_i^k (1 - x_i^k)$

步骤5 重复步骤2, 3, 4, 直到一定步数内(记为 N 次) f^* 保持不变为止, 然后进行以下步骤

步骤6 缩小各变量的搜索范围

$$a_i^{r+1} = m x_i^* - \gamma \cdot (b_i^r - a_i^r) \quad (13)$$

$$b_i^{r+1} = m x_i^* + \gamma \cdot (b_i^r - a_i^r) \quad (14)$$

其中： $\gamma \in (0, 0.5)$ ， $m x_i^* = a_i^r + x_i^* \cdot (b_i^r - a_i^r)$ 为当前最优解。为使新范围不致越界，需做如下处理：

若 $a_i^{r+1} < a_i^r$ 则 $a_i^{r+1} = a_i^r$ ；若 $b_i^{r+1} > b_i^r$ 则 $b_i^{r+1} = b_i^r$ 。

另外， x_i^* 还需做如下还原处理

$$x_i^* = \frac{m x_i^* - a_i^{r+1}}{b_i^{r+1} - a_i^{r+1}}$$

步骤7 本文设计把 x_i^* 与 x_i^k 的线性组合作为新的混沌变量，用此混沌变量进行搜索

$$y_i^k = (1 - \alpha) x_i^* + \alpha x_i^k \quad (15)$$

其中： α 为一较小的数。

步骤8 以 y_i^k 为混沌变量进行步骤2, 3, 4的操作。

步骤9 重复步骤7, 8的操作，直到一定步数内(记为 N 次) f^* 保持不变为止。然后进行以下步骤。

步骤10 $r := r + 1$ ，减小 α 的值，重复步骤6, 7, 8, 9的操作。

步骤11 重复步骤10若干次后结束寻优计算。

步骤12 此时的 $m x_i^*$ 即为算法得到的最优变量， f^* 为算法得到的最优解。

若对全局极大值优化问题 $\max f(\cdot)$ ，则可转化为全局极小值问题 $\min(-f(\cdot))$ 。

混沌运动能遍历空间内所有状态，但当空间较大时遍历时间较长。于是，考虑逐渐缩小寻优变量的搜索空间。从步骤6可以看出，本文算法的寻优区间最慢将以 2γ 的速率减小。另外，我们认为当前的

最优变量 $m x_i^*$ 不断朝真值靠近，故不断减小式(15)中 α 的值，让 $m x_i^*$ 在小范围内寻找，从而达到细搜索的目的。需要注意的是步骤5及9的运行次数较大，以利于当前最优点到达真正最优点附近。

4 无功规划优化的MSCOA实现

应用MSCOA求解电力系统无功规划优化问题时基本分为两个阶段，即粗搜索阶段和细搜索阶段。粗搜索阶段利用混沌变量的遍历性将优化变量带到最优解附近。细搜索阶段则根据问题本身的特性具体设置尺度变换的次数，另外还可以根据总的迭代次数设置结束条件。改进后的混沌优化算法继承了基本混沌优化算法的优点，不需要目标函数的导数及梯度信息，算法并不复杂。在算法实施过程中，要注意以下两个问题：

1) 优化变量的选取

对于以无功设备投资和系统有功网损的综合费用最小为目标函数，考虑功率平衡约束和变量约束无功规划优化问题，控制变量为发电机机端电压、无功补偿节点补偿容量、变压器变比，状态变量为发电机无功出力、负荷节点电压。该算法以控制变量为优化变量，对于发电机机端电压这类连续变量直接利用式(12)将混沌变量变换到控制变量的限值区间；而对于并联补偿电容器组和变压器变比等离散变量则分两步处理：首先将混沌变量映射到控制变量的限值区间，然后进行就近归整处理，得到整型变量。

2) 约束条件的处理

由于混沌优化算法具有自动适应优化变量取值范围的能力，而无功规划优化的控制变量就是算法中的优化变量，所以控制变量的不等式约束自动得到满足。从式(8)可以看出，对于状态变量的不等式约束采用罚函数的形式进行处理。功率平衡的等式约束通过潮流计算来处理。潮流计算的结果又是与当前优化变量对应的系统状态变量，可用于求解式(8)的目标函数。具体的求解流程应先读取原始数据，获得节点和支路信息以及变量的取值范围和个数；然后执行第3节变尺度混沌优化的步骤；最后输出无功规划优化的最优解。

5 算例

本文应用MSCOA对IEEE14节点系统进行了无功

规划优化计算。采用M语言编写仿真程序, 在 Matlab6.5 软件平台上调试通过。算法参数设置如下: $N=50$, $r=2$, $\gamma_1=0.5$, $\gamma_2=0.2$ 。

IEEE14 节点标准测试系统具体结构和参数详见文献[17]。电容器成本取为13.24 \$/100 Mvarh^[18], 有功电价取为200 \$/MWh。IEEE14 节点标准测试系统中, 有5 台发电机, 其中1 号节点的发电机为平衡节点, 3 台变压器, 1 个并联电容补偿点。各发电机机端调压范围为0.95~1.05; 负荷节点电压要求范围为0.95~1.05。设三台变压器均为有载调压变压器, 其主接头档位从-8~8 共计17 档, 调节步长为1.25%, 则变压器变比范围为0.9~1.1, 即 $1 \pm 8 \times 1.25\%$; 位于9 号节点的并联电容共19 组, 每组0.01 p.u.; 平衡节点1电压给定定为1.05; $S_B=100$ MVA。系统的PV节点数据和各节点的出力和负荷情况见表1、2^[19]; 表3为规划前优化后的控制变量值及有功网损; 表4为规划前优化后的节点参与因子, 根据本文第1节内容选择节点10、14为补偿节点, 最大补偿容量分别为0.07、0.24; 表5为无功规划优化后的控制变量值及目标值; 表6为混沌变量初值随机选取的优化结果; 表7为MSCOW与遗传算法(GA)及自适应遗传算法(AGA)的比较。

表1 本文所用的IEEE14 标准试验系统各节点的出力和负荷情况

Tab.1 Original generation and load of IEEE 14-bus system

节点	P_g /MW	P_L /MW	Q_L /MW
1	待求	0.00	0.00
2(PV)	140.00	43.4	21.00
3(PV)	100.00	188.40	61.80
4	0.00	95.60	45.30
5	0.00	1.50	0.70
6(PV)	80.00	22.40	10.80
7	0.00	0.00	0.00
8(PV)	80.00	0.00	0.00
9	0.00	59.00	28.60
10	0.00	18.00	8.70
11	0.00	7.00	3.40
12	0.00	12.20	5.90
13	0.00	27.00	13.10
14	0.00	29.80	14.40

注: P_g 表示有功出力, P_L 表示有功负荷, Q_L 表示无功负荷。

表2 IEEE14 系统 PV 节点的有关数据

Tab.2 PV-bus data of IEEE14-bus system

节点	节点电压	有功出力限值/MW		无功出力限值/Mvar	
		最小值	最大值	最小值	最大值
2	1.000	20.000	140.000	-67.80	86.80
3	1.000	20.000	100.000	-48.00	62.00
6	1.000	20.000	100.000	-48.00	62.00
8	1.000	20.000	100.000	-48.00	62.00

表3 规划前优化后的控制变量值、有功网损、电压越限个数

Tab.3 Optimized control variable, active power loss, voltage violation before planning

V_2	V_3	V_6	V_8	T_1	T_2	T_3	G_9	P_{loss}	电压越限个数
1.041 1	1.041 6	1.012 3	1.027 5	11	14	0	0.16	0.110 6	1

表4 规划前优化后的节点参与因子

Tab.4 Optimized bus participation factors before planning

节点4	节点5	节点7	节点9	节点10	节点11	节点12	节点13	节点14
0.008 3	0.014 3	0.007 3	0.071 6	0.177 4	0.130 0	0.017 2	0.051 9	0.522 1

表5 无功规划优化后的控制变量值及目标值

Tab.5 Optimized planning value of control variables and object

V_{e2}	V_{e3}	V_{e6}	V_{e8}	T_{17}	T_{19}	T_{36}	G_9	G_{10}	G_{14}	P_{loss}	Cost/(\$ \cdot h^{-1})
1.048 3	1.04	1.031 8	1.036 4	16	14	16	0.19	0.07	0.23	0.101 5	2 034.0

表6 混沌变量初值随机选取的优化结果

Tab.6 Optimized results of radom chaos variables

混沌变量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
有功网损	0.102 1	0.102 0	0.101 4	0.101 5	0.103 1	0.102 7	0.105 4	0.104 3	0.103 2	0.106 0
cost(\$/h)	2 045.8	2 043.8	2 031.4	2 034.0	2 064.8	2 057.2	2 112.0	2 089.8	2 066.3	2 121.1
电压越限个数	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注: P_{loss} 为有功网损; cost为式(2)的目标函数值。

表7 MSCOW与遗传算法(GA)及自适应遗传算法(AGA)的比较

Tab.7 Comparison among MSCOW GA and AGA

算法	有功网损(10次平均值)	计算时间(s/10次)
MSCOW	0.103 2	230.81
GA	0.106 5	1 732.21
AGA ^[19]	0.105 8	--

注: GA种群规模为40, 终止代数数为50; 计算机CPU为Pentium

III-733 MHz。

由表3、5、6, 无功规划优化后, 电压全部合格, 网损也有较大程度的改善; 由表6可知, 初值的选取不影响MSCOW的收敛, 且优化结果基本一致; 由表7可知, MSCOW寻优结果优于GA及AGA, 且计算时间大大缩短。

6 结论

本文首先用模态分析法确定系统的薄弱节点作为候选补偿点, 用电压越限筛选确定最大补偿容量, 然后用无功规划优化模型决定候选补偿点应加装的无功补偿容量。将MSCOA应用于电力系统无功规划优化问题, 针对无功规划优化是一种复杂的高维、非线性约束优化问题, MSCOA算法利用混沌变量自身的遍历性实现全局搜索; 以具有一定保证的当前最优解为中心, 通过不断缩小优化变量的搜索范围加强局部细化搜索能力; 同时适当调整“二次搜索”的调节系数, 促使搜索能够更快、更有效地收敛到全局最优解。对IEEE14节点系统的计算结果表明, 用本文的方法进行无功规划优化能有效地降低网损, 提高电压质量, 从而验证了模型的正确性和算法的有效性。初值的选取不影响MSCOW的收敛, 且优化结果基本一致。

参考文献

- [1] 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(6): 375-382.
DENG You-man, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. A Successive Linear Integer Programming Methodology for Capacitor Switching on Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(6): 375-382.
- [2] 李林川, 王建勇, 陈礼义, 等. 电力系统无功补偿优化规划[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 66-69.
LI Lin-chuan, WANG Jian-yong, CHEN Li-yi, et al. Optimal Reactive Power Planning of Electrical Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 66-69.
- [3] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5-8.
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al. Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8.
- [4] 顾丹珍, 徐瑞德. 一种地区电网多目标无功优化的新方法——改进模拟退火算法[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 71-74.
GU Dan-zhen, XU Rui-de. A New Approach for Multiple-objective Reactive Power Optimization-improved Simulated Annealing[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 71-74.
- [5] 张学松, 柳焯, 于尔铿. 基于Tabu方法的配电电容器投切策略[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 33-39.
ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng. The Strategy of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 33-39.
- [6] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [7] 余欣梅, 李研, 熊信良, 等. 基于PSO考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26-30.
YU Xin-mei, LI Yan, XIONG Xin-yin, et al. Optimal Shunt Capacitor Placement Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Harmonic Distortion Consideration[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 26-30.
- [8] 唐巍, 李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 36-40.
TANG Wei, LI Dian-pu. Chaotic Optimization for Economic Dispatch of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 36-40.
- [9] 李天云, 刘自发. 电力系统负荷的混沌特性及预测[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 36-40.
LI Tian-yun, LIU Zi-fa. The Chaotic Property of Power Load and Its Forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 36-40.
- [10] 孙雅明, 蔡晟. 相空间重构和混沌神经网络融合的短期负荷预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 44-48.
SUN Ya-ming, CAI Chen. A New Model STLF Based on the Fusion of PSRT and Chaotic Neural Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 44-48.
- [11] 卓峻峰, 赵冬梅. 基于混沌搜索的多目标模糊优化潮流算法[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 41-44.
ZHUO Jun-feng, ZHAO Dong-mei. A Chaos Optimization Based Algorithm for Multi-objective Fuzzy Optimal

- Power Flow[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 41-44.
- [12] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.
LI Bing, JIANG Wei-sun. Chaos Optimization Method and Its Application [J]. Control Theory and Application, 1997, 14(4): 613-615.
- [13] 张彤, 王宏伟, 王子才. 变尺度混沌优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 285-287.
ZHANG Tong, WANG Hong-wei, WANG Zi-cai. Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm and Its Application[J]. Control and Decision, 1999, 14(3): 285-287.
- [14] 泰勒. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Taylor C W. Voltage Stability in Power System[M]. WANG Wei-sheng, Trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [15] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Voltage Stability and Its Control in Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] 封向东, 祖小涛, 刘俊勇, 等. 电力系统无功优化和电压调控方案的研究[J]. 成都科技大学学报, 1995, 84(3): 86-92.
FWNG Xiang-dong, ZU Xiao-tao, LIU Jun-yong, et al. Optimization of Reactive Power and Voltage Control in Electric Power Systems Schemes[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995, 84(3): 86-92.
- [17] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Power Network Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [18] 戴彦. 电力市场中的无功功率服务定价研究(博士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
DAI Yan. Reactive Power Pricing in Electricity Market, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.
- [19] 夏可青. 电力市场环境下的无功规划优化的研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 东南大学, 2005.
XIA Ke-qing. Optimal Reactive Power Planning in Power Market, Thesis[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [20] 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): 49-53.
ZHANG Peng, LIU Yu-tian. A Simplified Dynamic Programming Approach to Voltage Var Control in Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1999, 11(4): 49-53.

收稿日期: 2006-08-04; 修回日期: 2006-10-17

作者简介:

蒋志平(1969-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定、人工智能、电力市场; E-mail: jiangzhiping91@sina.com

唐国庆(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定、故障诊断以及电力市场分析的研究。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- [11] 李萌, 沈炯. 基于自适应遗传算法的过热汽温 PID 参数优化控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 145-149.
LI Meng, SHEN Jiong. Simulating Study of Adaptive GA-based PID Parameter Optimization for the Control of Superheated Steam Temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 145-149.
- [12] 太军君, 等. 全数字水轮机调速器电液随动系统的仿真研究[J]. 水力发电, 2003, 29(11): 41-43.
TAI Jun-jun, et al. Simulation Study on Electrohydraulic Servo System of Gnu-digital Speed Governor System of Turbine[J]. Water Power, 2003, 29(11): 41-43.
- [13] Goldberg D E. Generic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. MA: Addison-wesley, 1989.
- [14] 刘觉民, 付振宇, 等. 发电机原动系统仿真器程序设计[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(1): 29-32.
LIU Jue-min, FU Zhen-yu, et al. Programming of the Prime System Emulator of Generators[J]. Journal of Hunan University, 2005, 32(1): 29-32.
- [15] 刘觉民. 原动机调速系统仿真模型动态特性研究[J]. 湖南大学学报, 1994, 21(2): 98-104.
LIU Jue-min. Study on Dynamic Characteristic of Emulation Model for Governing System of Prime Movers[J]. Journal of Hunan University, 1994, 21(2): 98-104.
- [16] LIU Jue-min, DIAO Xian-qiang, FU Zhen-yu. Study on Increasing the Reliability of Speeder System in Analogue Prime Movers[A]. In: Proceedings of the 1st International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts[C]. Suzhou: 2004.

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-09-13

作者简介:

陈明照(1982-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子技术在电力系统应用方向研究; E-mail: powermzhchen@yahoo.com.cn

刘觉民(1950-), 男, 副教授, 主要从事电力电子技术和电力系统可靠性方向教学与科研;

谭立新(1971-), 男, 副教授, 从事电力电子技术及其应用的研究。