

文章编号:1671-6833(2008)02-0069-04

## 应用模拟树木生长算法求解无功优化问题

杨丽徙<sup>1</sup>, 王 锴<sup>1</sup>, 黄训诚<sup>2</sup>, 程 杰<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省电力公司, 河南 郑州 450006)

**摘 要:** 将模拟树木生长算法应用于电力系统无功优化, 对目标函数及约束条件处理方便, 且不需要给出很多优化参数。建立无功优化的数学模型, 变步长和最优解保留策略的应用提高了算法的全局寻优能力和寻优速度。IEEE 30 节点系统的计算分析结果表明, 模拟树木生长算法有较强的收敛稳定性, 是处理无功优化问题的一种可行的、有效的方法。

**关键词:** 无功优化; 模拟树木生长算法; 变步长; 最优解保留策略

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

### 0 引言

电力系统无功优化的目的是减少网络损耗, 改善电压质量, 提高系统运行的稳定性。

传统的无功优化方法比较成熟的有线性规划、非线性规划、灵敏度法等<sup>[1-2]</sup>, 但这些方法要求目标函数和约束条件连续、可微, 且容易陷入局部最优解。为了弥补传统方法的不足, 近年来, 遗传算法<sup>[3-4]</sup>、模拟退火算法<sup>[5]</sup>、Tabu 搜索法<sup>[6]</sup>、粒子群算法<sup>[7]</sup>、差异进化算法<sup>[8]</sup>等全局搜索寻优技术在无功优化中得到广泛应用, 其不足在于这些算法需要给出初始染色体群、惩罚系数、初始粒子群、交叉率、变异率等, 这些参数的优化将直接影响计算速度、收敛性能和寻优结果。

模拟树木生长算法将目标函数和约束条件分开处理, 不要求连续、可微, 有较强的全局寻优能力和较快的收敛速度, 且不需要给出很多优化参数, 是处理无功优化问题的一种新的、可行的方法。

### 1 模拟树木生长算法

模拟树木生长算法, 就是将优化问题的可行域作为树木的生长环境, 将全局最优解当作光源, 模拟真实树木生长的向光性机理, 建立枝叶在不同光线强度环境下向光源快速生长的动力机制。

模拟树木生长算法首先建立 4 个概念: 树根、树干、树枝和生长点。树根为控制变量的初始值; 树干和树枝的作用在于从树根出发, 建立跨域优

化问题可行域的拓扑结构; 生长点即树木生长细胞, 代表优化问题的解空间分布。

当树木有一个以上的生长点时, 具体哪个生长点能长出新枝取决于其形态素浓度  $P$ ,  $P$  值高的生长点将具有较大的优先生长机会。生物学实验已证明, 决定树木枝芽生长的  $P$  值取决于生长点位置的环境信息, 依据这种信息, 树木表现出明显的向光性特点。

当后续新的生长点产生后,  $P$  值将根据新系统所在环境的改变, 重新在各生长点之间进行分配。生长点的目标函数值越小,  $P$  值越高, 生长条件越好。在寻优过程中, 只计算生长条件比树根好的生长点的  $P$  值。

设树干  $M$  和树枝  $m$  上分别有  $k$  个和  $l$  个生长点  $(S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mk})$  和  $(S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{ml})$ , 每一个生长点的形态素浓度分别为  $(P_{M1}, P_{M2}, \dots, P_{Mk})$  和  $(P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{ml})$ , 则树干及树枝上各生长点形态素浓度值分别为<sup>[9]</sup>

$$P_{Mi} = [f(x_0) - f(S_{Mi})] / \left[ \sum_{i=1}^k (f(x_0) - f(S_{Mi})) + \sum_{j=1}^l (f(x_0) - f(S_{mj})) \right] \quad (1)$$

$$P_{mj} = [f(x_0) - f(S_{mj})] / \left[ \sum_{i=1}^k (f(x_0) - f(S_{Mi})) + \sum_{j=1}^l (f(x_0) - f(S_{mj})) \right] \quad (2)$$

式中:  $x_0$  是初始可行解;  $f(\cdot)$  为目标函数值。各生长点的  $P$  值由该点对树根的相对位置及该位

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-04-30

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金项目(2004601067)。

作者简介: 杨丽徙(1956-), 女, 江苏人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电网规划方面的研究。

置的环境信息(目标函数值)确定,这与真实树木细胞的形态素浓度生成机理一致。

由式(1)和式(2)不难证明:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l (P_{Mi} + P_{mj}) = 1$$

因此  $k+l$  个生长点的形态素浓度构成如图 1 所示的状态空间图。

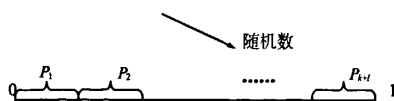


图 1 形态素浓度状态空间

Fig. 1 Morphactin concentration state space

该  $[0,1]$  闭区间中的任意一个随机数  $\eta$  所对应的生长点都可以作为下一次循环的新基点并长出新枝。新枝长成后,  $k$  和  $l$  将发生变化, 长出新枝的原生长点被取消, 新枝中的生长点将加入。如此反复, 直到满足终止条件为止。

## 2 模拟树木生长算法在无功优化中的应用

### 2.1 无功优化的数学模型

电力系统无功优化是以发电机端电压、有载调压变压器分接头、电容器无功补偿容量为控制变量, 以负荷节点电压、发电机无功功率为状态变量, 通过对各控制变量进行调节, 使网络损耗达到最小, 同时保证各状态变量在给定的范围内。

以网络损耗最小为目标的优化问题, 其目标函数和约束条件分别为

$$\min f = P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (3)$$

$$P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \quad (i \in N_N - N_S) \quad (4)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad (i \in N_{PQ}) \quad (5)$$

$$U_{\text{Gimin}} \leq U_{Gi} \leq U_{\text{Gimax}}, \quad (i \in N_G) \quad (6)$$

$$T_{k\text{min}} \leq T_k \leq T_{k\text{max}}, \quad (k \in N_T) \quad (7)$$

$$Q_{\text{Cimin}} \leq Q_{Ci} \leq Q_{\text{Cimax}}, \quad (i \in N_C) \quad (8)$$

$$U_{\text{imin}} \leq U_i \leq U_{\text{imax}}, \quad (i \in N_N - N_G) \quad (9)$$

$$Q_{\text{Gimin}} \leq Q_{Gi} \leq Q_{\text{Gimax}}, \quad (i \in N_G) \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{loss}}$  为总的有功网络损耗;  $N_N$ 、 $N_{PQ}$ 、 $N_G$ 、 $N_T$  和  $N_C$  分别为全体节点集合、PQ 节点集合、发电机节点集合、变压器支路集合和无功补偿节点集合;  $N_i$  为与  $i$  节点相关联的节点集合, 包括节点  $i$  本身;  $N_S$  为平衡节点;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点导纳矩阵元素

的实部和虚部;  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为节点  $i$  的有功和无功发电功率;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  分别为节点  $i$  的有功和无功负荷功率;  $U_{Gi}$ 、 $U_{\text{Gimin}}$  和  $U_{\text{Gimax}}$  分别为节点的发电机端电压、发电机端电压下限和上限;  $T_k$ 、 $T_{k\text{min}}$  和  $T_{k\text{max}}$  分别为支路  $k$  的变压器变比、变比下限和上限;  $Q_{Ci}$ 、 $Q_{\text{Cimin}}$  和  $Q_{\text{Cimax}}$  分别为节点  $i$  的无功补偿容量、无功补偿容量下限和上限;  $U_i$ 、 $U_{\text{imin}}$  和  $U_{\text{imax}}$  分别为负荷节点  $i$  的电压、电压下限和上限;  $Q_{Gi}$ 、 $Q_{\text{Gimin}}$  和  $Q_{\text{Gimax}}$  分别为节点  $i$  的发电机无功、发电机无功下限和上限。

### 2.2 可行解的保留策略

若某一生长点的目标函数值小于初始可行解的目标函数值, 且潮流计算所得各状态变量不越限, 则该生长点是无功优化的可行解。

生长点集是无功优化可行解的集合。若把每次循环中新产生的可行解都添加到生长点集内, 则随着循环过程的进行, 生长点集内将有大量的可行解。在每次循环中都要对其进行比较、判断、计算, 将耗费大量的时间。

因此, 可以考虑生长点集内只保留以往的  $F$  个最优可行解和本次循环新生成的可行解, 以保证树木生长过程中的最优性和多样性, 避免陷入局部最优解, 能快速找到全局最优解。  $F$  值与控制变量的总个数有关, 一般取控制变量总个数的 2~3 倍:

$$F = (2 \sim 3) \times (N_G + N_T + N_C) \quad (11)$$

### 2.3 步长的定义及选取

若步长的选取为常量, 将导致生长点集内的可行解在每次循环中变化不大, 循环到一定次数后没有新的可行解产生, 易陷入局部最优解。

模拟树木生长算法的步长同时考虑了干长和枝长。当循环次数是 1 或循环次数是  $K$  ( $K$  为大于 1 的整数) 的整数倍时, 步长取干长; 其余循环步长均取枝长, 以保持生长点集内可行解的多样性, 提高全局寻优能力。

### 2.4 新生长点的生成

设随机数  $\eta$  对应的生长点包含了无功补偿设备、变压器分接头和发电机端电压等  $n$  个控制变量, 上限分别为无功补偿总组数、变压器主变抽头调节档数和发电机电压调节档数; 下限均为 0。

设某一次循环的基点为  $x_B = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ , 步长为  $\lambda$ , 让每一个控制变量分别加上或减去步长, 同时保持其它各控制变量不变, 即可得到  $2n$  个新生长点。其中:

$$x_{2i-1} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} + \lambda, \dots, x_{n0}), i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$x_{2i} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0} - \lambda, \dots, x_{n0}), i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

若某一个控制变量加上或减去步长后越限则取限值。

## 2.5 无功优化模型的求解步骤

(1) 输入原始数据。包括潮流计算数据、无功控制变量描述和各种约束条件, 给出各控制变量的初始值  $x_0$  (包括投入运行的无功补偿设备组数、主变抽头档位、发电机端电压档位)。

(2) 产生初始解。潮流计算, 检验各发电机无功出力、负荷节点电压是否满足约束。若不满足, 则修改  $x_0$  重新计算潮流; 若满足, 则求出网络的有功功率损耗, 即目标函数初值  $f(x_0)$ 。

(3) 确定循环基点。令基点  $x_B$  及目标函数最小值所对应的点  $x_{\min}$  都为  $x_0$ , 即  $x_B = x_{\min} = x_0, f_{\min} = f(x_0)$ 。其中  $x_0, x_B, x_{\min}$  均为相应点的向量形式,  $f_{\min}$  为目标函数的最小值。令循环次数及最小值重复出现次数均为 1, 初始生点集为空。

(4) 判断终止条件。若循环次数大于  $N$  或最小值重复出现次数达到  $N_{\max}$  则计算结束; 否则, 转入下一步。

(5) 产生新生长点。以  $x_B$  为基点, 以  $\lambda$  为步长得到  $2n$  个新生长点, 将新生长点中的各可行解并入生长点集。

(6) 确定目标函数最小值。将第(5)步所得各可行解的目标函数值最小者与  $f_{\min}$  比较, 若小于  $f_{\min}$  则置换  $f_{\min}$  及  $x_{\min}$ ; 否则保留  $f_{\min}$  及  $x_{\min}$ , 并使最小值重复出现次数加 1。

(7) 按式(1)、(2)的方法计算生长点集内各可行解的形态素浓度。

(8) 确定新基点及新生长点集。利用计算机产生一个位于区间  $[0, 1]$  的随机数  $\eta$ ,  $\eta$  将落入图 1 所示的形态素浓度状态空间的某一区间, 该区间对应的可行解即为下一次循环的新基点  $x_B$ , 并将  $x_B$  从生长点集去除。将生长点集内的各可行解按目标函数值从小到大排序, 若可行解个数大于  $F$  则取前  $F$  个可行解构成新的生长点集; 否则, 保留原生长点集。循环次数加 1, 转到第(4)步。

## 3 算例及分析

IEEE 30 节点系统有 30 个节点、41 条支路、6 个发电机节点、4 个变压器支路、9 个电容器无功补偿点。发电机节点的编号为 1, 2, 5, 8, 11, 13, 变压器支路的编号为 11, 12, 15, 36, 电容器无功补

偿节点的编号为 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, 29。节点数据和支路数据详见文献[11], 总的有功负荷和无功负荷分别为 283.4 MW 和 126.2 MVar, 初始有功网络损耗为 5.538 47 MW。计算中取节点 1 为平衡节点, 其余发电机节点为 PV 节点, 其它节点为 PQ 节点。基准功率取 100 MVA, 发电机节点电压的取值范围是 0.95 ~ 1.1, 负荷节点电压的取值范围是 0.95 ~ 1.05, 变压器变比的取值范围是 0.9 ~ 1.1, 分 10 档, 电容器无功补偿容量的取值范围是 0.00 ~ 0.05, 分 10 组, 各发电机无功出力的取值范围如表 1 所示:

表 1 各发电机无功出力取值范围  
Tab.1 Limits of reactive of generator

发电机/ $p_u$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_5$	$Q_8$	$Q_{11}$	$Q_{13}$
上限	0.586	0.480	0.600	0.580	0.150	0.150
下限	-0.298	-0.220	-0.300	-0.290	-0.075	-0.078

优化前各发电机端电压分别为 1.05, 1.04, 1.01, 1.01, 1.05, 1.05, 各变压器变比分别为 1.078, 1.069, 1.032, 1.068, 各无功补偿容量均为 0。

应用模拟树木生长算法求得的优化计算结果表明, 在网损最小的条件下, 对应的各发电机端电压分别为 1.064, 1.052, 1.036, 1.036, 1.064, 1.052, 各变压器变比分别为 1.04, 0.94, 1.00, 1.02, 各电容器无功补偿容量分别为 0.020, 0.050, 0.045, 0.050, 0.050, 0.050, 0.045, 0.050, 0.030; 所有负荷节点电压合格, 发电机无功出力均在极限内。

表 2 给出了针对同一算例, 采用模拟树木生长算法、标准遗传算法<sup>[12]</sup>和粒子群优化算法得到的 10 次优化结果、平均网损、最差网损和最优网损。从表 2 可以看出, 模拟树木生长算法得到的优化方案网损最小, 有更强的收敛稳定性。

表 2 不同算法优化结果比较  
Tab.2 Comparison of optimization results of different algorithms

优化结果	模拟树木生长算法	标准遗传算法	粒子群优化算法
1	0.048 83	0.049 95	0.049 99
2	0.048 82	0.049 88	0.051 26
3	0.048 85	0.050 90	0.051 06
4	0.048 88	0.052 46	0.051 98
5	0.048 81	0.051 05	0.049 26

续表 2

优化结果	模拟树木 生长算法	标准遗 传算法	粒子群 优化算法
6	0.048 85	0.049 80	0.051 23
7	0.048 82	0.050 82	0.051 93
8	0.048 82	0.049 93	0.052 27
9	0.048 89	0.051 25	0.050 08
10	0.048 83	0.051 97	0.051 03
平均网损/ $p_u$	0.048 84	0.050 80	0.051 01
最差网损/ $p_u$	0.048 89	0.052 46	0.052 27
最优网损/ $p_u$	0.048 81	0.049 80	0.049 26

#### 4 结论

模拟树木生长算法将目标函数和约束条件分开处理,不要求连续、可微,且不需要给出很多参数,有一定的全局寻优能力,更适合求解无功优化问题。通过对生长点集及步长选取的优化,可以缩短求解优化问题的计算时间、提高全局寻优能力。算例的优化结果证明了上述结论。

#### 参考文献:

- [1] 谢传治,高喜珠,闫永生,等.基于非线性原-对偶内点算法的电力系统无功优化[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(2):77-80.
- [2] 王克文,姜俊峰,刘宪林,等.求灵敏度指标在10kV配电线路无功补偿中的应用[J].郑州大学学报:工学版,2002,23(3):70-74.
- [3] ZHANG H B,ZHANG L Z,MENG F L. Reactive power optimization based on genetic algorithm[C]. Proceedings of the International Conference on Power System Technology, Beijing,1998,2:1448-1453.
- [4] 潘哲龙,张伯明,孙宏斌,等.分布计算的遗传算法在无功优化中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(12):32-35.
- [5] 贾德香,唐国庆,韩净.基于改进模拟退火算法的电网无功优化[J].继电器,2004,32(5):13-18.
- [6] 叶品勇,都洪基.改进Tabu方法在无功优化中的应用[J].电气应用,2007,26(2):32-36.
- [7] YOSHIDA H,KAWATA K,FUKUYAMA Y,et al. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment[J].IEEE Trans on Power System,2000,15(4):1232-1239.
- [8] 梁才浩,段献忠,钟志勇,等.基于差异进化和PC集群的并行无功优化[J].电力系统自动化,2006,30(1):29-34.
- [9] 李彤,王春峰,王文波,等.求解整数规划的一种仿生类全局优化算法—模拟植物生长算法[J].系统工程理论与实践,2005,25(1):76-85.
- [10] LEE K Y,PARK Y M,ORTIZ J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J].IEEE Trans on Power Apparatus and System,1985,104(5):1147-1153.
- [11] WU Q H,CAO J Y,WEN J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Int. J. Electric Power & Energy System,1998,20(8):563-569.

### Application of Trees Growth Simulation Algorithm to Solve Reactive Power Optimization Problem

YANG Li-xi<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HUANG Xun-cheng<sup>2</sup>, CHENG Jie<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** Trees growth simulation algorithm (TGSA) is a kind of bionics random algorithm, and this algorithm simulates phototropism theory of trees, and takes globally optimal solution as light source. Trees growth simulation algorithm is applied to power system reactive power optimization and it can conveniently deal with objective function and constraint condition and doesn't need giving many optimization parameters. The use of variety pedometer and optimal solution hold strategy increases algorithm's global optimization ability and optimization speed. The results of calculation and analysis of IEEE 30-bus system show that trees growth simulation algorithm has strong global optimization ability and convergence stability, which is a feasible and effective method to deal with reactive power optimization.

**Key words:** reactive power optimization; trees growth simulation algorithm; variety pedometer; optimal solution hold strategy