

基于改进 AFSA 算法的电力系统无功优化

刘耀年, 范为, 韩立国

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 将人工鱼群算法(AFSA)应用到电力系统无功优化问题的研究中,建立了相应的优化模型。为提高AFSA的搜索能力,对AFSA进行了改进,在算法中加入了生存机制、竞争机制。对IEEE6、14节点系统的仿真计算结果表明了算法的有效性。

关键词: 无功优化; 人工鱼群优化算法; 电力系统

Research on the reactive power optimization based on AFSA algorithm

LIU Yao-nian, FAN Wei, HAN Li-guo

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: An artificial fish-swarm algorithm (AFSA) for reactive power optimization of power system and a model based on AFSA are presented in this paper. The survival mechanism and the competitive mechanism are included in the algorithm in order to enhance the search capability of AFSA algorithm. Simulation results on IEEE6 and IEEE14 systems demonstrate the efficiency of the algorithm.

Key words: reactive power optimization; AFSA algorithm; power system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0026-05

0 引言

无功优化是电力系统运行与控制中的一个传统课题,是保证系统安全、经济、稳定运行的有效手段,也是降低系统网损、提高电压质量的重要措施。无功优化问题可分为两类:一类是常规解析式优化方法;另一类是智能启发式优化算法^[1]。传统的常规解析式方法通常需要使用梯度矢量信息,由于电力系统无功优化中存在较多离散变量,使得在求解一些问题时不得不做一些近似处理,而且传统算法都是基于单点的搜索方法,很容易由于初始点的选取不当而陷入局部极值区。智能启发式优化算法由于可以处理离散、非凸的非线性问题,较常规算法更能找到全局最优解,在处理无功优化问题时具有较好的效果。

人工鱼群算法^[2,3]是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索优化算法,从构造单条鱼的底层行为做起,利用了鱼的觅食、聚群和追尾行为,通过鱼群中各个体的局部寻优达到全局最优值在群体中突显出来的目的。文献^[2,3]的计算实例表明该算法具有良好

的克服局部极值、取得全局极值的能力。

本文针对实际系统常见的变量维数高、约束方程多等特点,尝试将改进的人工鱼群算法用于电力系统无功优化,建立了基于该算法的无功优化模型,仿真结果表明本文的模型和算法是可行的、并具有很好的适用性。

1 无功优化数学模型

无功优化的目的是通过调整无功潮流的分布降低有功网损,并保持最好的电压水平,因此,通常采用的目标是有功网损最小。无功潮流分布的变动,可以通过改变无功源的注入无功、调整节点电压幅值以及变压器的分接头来实现,但是这些量之间的变化应满足潮流方程,它们并不是都能独立调整的。因此,在进行无功优化时,应将控制变量及状态变量区分开。控制变量的选取方式有多种,本文的无功优化模型选择发电机节点电压幅值、无功补偿源节点的注入无功及变压器的可调分接头作为控制变量,在电网有功潮流分布已经确定的情况下,以系统网损最小为目标,其数学模型为式(1):

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2) \\ \text{s.t. } g(x_1, x_2) = 0 \\ x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max} \\ x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $f(x_1, x_2)$ 为系统有功损耗; $g(x_1, x_2)$ 为潮流方程; x_1 为控制变量; x_2 为状态变量。且必须满足潮流方程和变量约束。

潮流约束方程:

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中: n 为系统总节点数; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机节点的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为负荷节点的有功和无功负荷功率; Q_{Ci} 为节点 i 无功补偿容量; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导和电纳。

变量约束

PQ 节点电压安全约束

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad i \in N_{PQ} \quad (4)$$

发电机节点无功范围约束

$$Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \quad i \in N_G \quad (5)$$

无功补偿节点无功装置容量约束

$$Q_{Ci\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\max} \quad i \in N_c \quad (6)$$

变压器分接头位置变化范围约束

$$T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \quad i \in N_T \quad (7)$$

PV 节点电压安全约束

$$V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \quad i \in N_{PV} \quad (8)$$

以上各式中, 下标 \max 和 \min 分别表示该变量的上、下限值。式(2)和(3)是潮流方程的约束, 式(4)和(5)是状态变量的约束, 式(6)~(8)是控制变量自身的约束, 状态变量为控制变量的函数, 隐含在潮流方程中。

2 人工鱼群算法描述

2.1 相关定义

人工鱼个体的状态可表示为向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 $x_i (i=1, \dots, n)$ 为欲寻优的变量; 人工鱼当前所在位置的食物浓度表示为 $Y = f(X)$, 其中 Y 为目标函数值; 人工鱼个体之间的距离表示为: $d_{i,j} = \|X_i - X_j\|$ 。其中, $Visual$ 表示人工鱼的感知距离; $Step$ 为人工鱼移动最大步长; δ 为拥挤度因子。

2.2 行为描述

1) 觅食行为 设人工鱼当前状态为 X_i , 在其

感知范围内随机选择一个状态 X_j , 如果在求极大问题中, $Y_i < Y_j$ (或在求极小问题中, $Y_i > Y_j$, 因极大和极小问题可以互相转换, 所以以下均以求极大问题讨论), 则向该方向前进一步; 反之, 再重新随机选择状态 X_j , 判断是否满足前进条件; 这样反复尝试 try_number 次后, 如果仍不满足前进条件, 则随机移动一步。

2) 聚群行为 设人工鱼当前状态为 X_i , 探索当前邻域内 ($d_{i,j} < Visible$) 的伙伴数目 n_f 及中心位置 X_c , 如果 $Y_c / n_f > \delta Y_i$, 表明伙伴中心有较多的食物并且不太拥挤, 则朝伙伴中心位置前进一步; 否则执行觅食行为。

3) 追尾行为 设人工鱼当前状态为 X_i , 探索当前邻域内 (即 $d_{i,j} < Visible$) 的伙伴中 Y_j 为最大的伙伴 X_j , 如果 $Y_j / n_f > \delta Y_i$, 表明伙伴的状态具有较高的食物浓度并且其周围不太拥挤, 则朝伙伴 X_j 的方向前进一步; 否则执行觅食行为。

4) 随机行为 随机行为的实现较简单, 就是在视野中随机选择一个状态, 然后向该方向移动, 它实际是觅食行为的一个缺省行为。

5) 公告板 算法中设立一个公告板, 用以记录最优人工鱼个体状态及该人工鱼位置的食物浓度值。每条人工鱼在行动一次后就将自身状态与公告板进行比较, 如果优于公告板则用自身状态取代公告板状态。

2.3 行为选择

根据所要解决的问题性质, 对人工鱼当前所处的环境进行评价, 从而选择一种行为。如较常用的评价方法就是选择各行为中使得人工鱼的下一个状态最优的行为, 如果没有能使下一状态优于当前状态的行为, 则采取随机行为。

3 基于人工鱼群算法的无功优化

3.1 控制变量的选取

采用人工鱼群算法进行无功优化时, 人工鱼的位置 x 的各维变量由无功优化问题中的控制变量 V_G 、 T 、 Q_C 组成, 即

$$x = [V_G | T | Q_C] = [V_{G1}, \dots, V_{GNG} | T_1, \dots, T_{NT} | Q_{C1}, \dots, Q_{CNC}] \quad (9)$$

控制变量的约束方程式(6)~(8), 即 x 各维变量的取值范围将可在 AFSA 中自动得到满足, 同时无功优化过程中的潮流方程求解保证了潮流约束方程式(2)和(3)均能得到满足。因此, 在 AFSA 无功优化中, 真正需要考虑的约束条件是状态变量的约束方程式(4)和(5)。

3.2 动态调整罚函数

本文采用了动态调整罚函数,根据等式约束和不等式约束在计算过程中越界量的大小,动态地调节其罚函数。首先将越界不等式约束以惩罚项的形式附加在原来的目标函数 $f(x, u)$ 上,从而构成一个新的目标函数 $F(x, u)$:

$$F(x, u) = f(x, u) + h(k)H(x, u) \quad (10)$$

其中: $f(x, u)$ 为等式(1)中原来的目标函数; $h(k)$ 的数值可随迭代次数而改变,若 k 为当前迭代次数,一般 $h(k)=k\sqrt{k}$; $H(x, u)$ 为惩罚项。

$$H(x, u) = \sum_{i=1}^{m+n} \alpha q_i(x, u) \chi q_i(x, u) \quad (11)$$

$$q_i(x, u) = \max\{0, |g_i(x, u)|\} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$q_i(x, u) = \max\{0, h_i(x, u)\} \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中: m 、 n 分别是等式约束和不等式约束的个数; $q_i(x, u)$ 是约束条件的越界函数; $\alpha q_i(x, u)$ 和 $\chi q_i(x, u)$ 是随 $q_i(x, u)$ 改变的函数; $\gamma(q_i(x, u))$ 是罚函数的乘方。 $\alpha q_i(x, u)$ 和 $\chi q_i(x, u)$ 根据越界量的大小动态调节其取值范围,这样就避免了罚因子选取不当对算法造成的影响,能够有效提高算法的收敛能力和求解精度。根据以上动态调整罚函数法,将无功优化问题转化为一个无约束求极值的问题,用改进的鱼群算法进行求解。

3.3 人工鱼群算法的改进

在以上所述的鱼群算法中,当寻优域较大或处于变化平坦的区域时,一部分AF将处于无目的的随机移动中,这影响了寻优的效率,下面引入生存机制和竞争机制加以改善。

生存机制的描述如下

$$h = E/(KT); \begin{cases} h \geq 1 :: AF_move \\ h < 1 :: AF_init \end{cases} \quad (13)$$

式中: h 为生存指数; E 为AF当前所处位置的食物能量值; T 为AF的生存周期; K 为消耗因子,即单位时间内消耗的能量值。即当AF所处位置的食物能量足以维持其生命时,AF将按照正常的行为寻优,否则,当此处的能量低于其生命的维持所需时,通常此时处于局部极值点或非极值点附近,寻优通常会没有结果,所以,强制该AF初始化,例如,可以随机产生该AF的位置,使其跳出该区域,这样就相当于利用相同的存储空间增加了寻优AF的个数,从而提高了算法的效率。

竞争机制就是实时地调整AF的生存周期,其描述如下:

$$T = \varepsilon E_{\max} / K \quad (14)$$

式中: E_{\max} 为当前所有的AF中所处位置的食物能量的最大值; ε 为比例系数。随着寻优的逐步进展,AF的生存周期将被其中最强的竞争者所提升,从而使那些处于非全局极值点附近的AF能有机会展开更广范围的搜索。

3.4 无功优化的计算步骤

基于人工鱼群算法求解无功优化问题,可按以下步骤进行:

1) 输入原始数据,获取计算所需参数。

2) 当前迭代次数 $G_{\text{en}}=0$,利用随机数发生器在控制变量可行域内随机生成 N 个人工鱼个体,形成初始鱼群。人工鱼个体的控制变量取值序列为 $x=[V_G|T|Q_C]=[V_{G1}, \dots, V_{GN}|T_1, \dots, T_{NT}|Q_{C1}, \dots, Q_{CN}]$ 。每个个体按以下方法产生:

a. 生成 $N_T+N_G+N_C$ 个(设共为 K 个) $[0,1]$ 区间内的随机数,并根据下式计算出控制变量值:

$x_k = \text{Rand}(x_{k\max} - x_{k\min}) + x_{k\min}$, 式中: $x_k(k=1, 2, \dots, K)$ 为控制变量; $\text{Rand}(x_{k\max} - x_{k\min})$ 为 $[x_{k\min}, x_{k\max}]$ 区间内的随机数; $x_{k\max}$ 、 $x_{k\min}$ 为各控制变量的上限及下限。

b. 根据各控制变量的取值进行潮流计算,若潮流收敛,则保留该初始人工鱼个体,否则转步骤a。

c. 已生成 N 个人工鱼,转步骤3),否则转步骤a。

3) 计算初始鱼群各人工鱼个体当前位置的食物浓度值(取为式(10)中 F 的倒数,即 $FC=1/F$),并比较大小,取 FC 为最大值者进入公告板,保存其状态及 FC 值。

4) 各人工鱼分别模拟执行①追尾行为;②聚群行为;选择行动后 FC 值较大者的行为实际执行,缺省行为方式为觅食行为。

5) 各人工鱼每行动一次后,用生存机制和竞争机制判断AF是否处于寻优域较大或处于变化平坦的区域,是则返回步骤2),否则检验自身状态与公告板状态,如果优于公告板状态,则以自身状态取代之。

6) 终止条件判断。判断 G_{en} 是否达到预置的最大迭代次数 G_{enmax} ,若是,则输出计算结果(即公告板的值),否则 $G_{\text{en}}=G_{\text{en}}+1$,转步骤4)。

4 仿真结果及分析

为了检验本文算法的有效性,对IEEE6、14节点系统进行了优化计算测试,并将结果与基本鱼群算法和其它算法进行了比较,证明了本算法的有效

性和可行性。

4.1 参数设置

算法的参数设置分别为：人工鱼群体规模 $N = 20$ ，最大移动步长 $Step = 0.005$ ，人工鱼的可见域 $Visual = 0.025$ ，拥挤度因子 $\delta = 1.618$ ，最大迭代次数 $G_{en\max} = 20$ 。

算法实施中罚因子的确定方法：在本文的研究过程中确定以下参数选择对优化潮流问题的计算能够获得满意的解。

$$\theta(q_i(x,u)) = \begin{cases} 10 & q_i(x,u) \leq 0.001 \\ 20 & 0.001 < q_i(x,u) \leq 0.1 \\ 100 & 0.1 < q_i(x,u) \leq 1 \\ 300 & q_i(x,u) > 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$r(q_i(x,u)) = \begin{cases} 1 & q_i(x,u) \leq 1 \\ 2 & q_i(x,u) > 1 \end{cases}$$

4.2 IEEE6 节点算例

为了与文献[4]的结果进行比较，本文 IEEE6 节点算例采用与其相同的系统数据和接线图，参数的基准容量为 100 MVA。该系统包括 2 条发电机母线、7 条支路，其中 2 条支路：(6, 5)、(4, 3) 为变压器支路（分别对应 T65、T43），可调变压器支路的可调变比范围均为 0.90 到 1.10，调节步长为 0.0125；母线 4、6 装有并联无功补偿装置，初始补偿容量设为 0，最大补偿容量分别为 0.050 和 0.055，补偿电容的调节步长为 0.001。电压幅值标幺值限定是：发电机节点 1 的电压范围为 1.00 到 1.10，发电机节点 2 的电压范围为 1.10 到 1.15，负荷节点的电压范围为 0.9 到 1.05。

4.2.1 本文算法和基本鱼群算法仿真结果比较

在 AFSA 算法中，参数设置同上，以最大迭代次数作为算法终止条件。两种算法的仿真结果比较如表 1 所示。

从表 1 中可以看出：

1) 初始潮流有功网损为 11.51 MW，用本文算法优化后的结果为 8.79 MW，下降了 2.722 MW，即有功网损降低了 30.97%；

2) 与 AFSA 方法相比，改进后的 AFSA 算法搜索能力提高，能搜索到更好的优化解，优化后的系统网络损耗等各项性能指标均优于 AFSA 算法。

4.2.2 本文算法与其它优化算法的仿真结果比较

表 2 给出了 GA(遗传算法)、本文算法所得的优化结果与文献[5]中另 3 种优化算法（线性规划法 LP、现代启发式算法 Box 算法、改进的 Tabu 搜索算法 MTSA）的结果对照表。

表1 本文算法与AFSA算法优化结果对照表

Tab.1 Comparison of optimization results between the algorithm of this paper and artificial fish-swarm algorithm

	T65	T43	VG1	VG2	QC4	QC6	
初始潮流	1.100	1.025	1.050	1.100	0.000	0.000	
AAFSA 优化	0.961	0.981	1.099	1.142	0.050	0.055	
本文算法	0.959	0.983	1.099	1.100	0.050	0.055	
	Q QG1	QG2	Vd3	Vd4	Vd5	Vd6	Ploss
0.0376	0.347	0.852	0.954	0.901	0.936	0.1151	
0.0381	0.175	1.005	1.004	0.996	0.987	0.0885	
0.0374	0.165	1.002	1.002	0.998	0.997	0.0876	

表2 IEEE6节点系统无功优化计算结果对照表

Tab.2 Comparison of optimization results of IEEE-6 buses system

	初始潮流	LP 优化	Box 优化	MTSA 优化	GA 优化	本文算法
T65	1.100	0.9427	0.9539	0.9493	0.9539	0.9587
T43	1.025	0.9809	0.9841	0.9834	0.9841	0.9834
VG1	1.050	1.100	1.0935	1.1000	1.093	1.0999
VG2	1.100	1.134	1.1452	1.1417	1.145	1.1004
QC4	0.000	0.050	0.050	0.050	0.048	0.049
QC6	0.000	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
QG1	0.376	0.413	0.3284	0.3921	0.374	0.3735
QG2	0.347	0.148	0.1736	0.1653	0.186	0.1655
Vd3	0.8516	1.00	1.0029	1.0021	0.998	1.0021
Vd4	0.9542	0.00	1.0047	1.0041	0.999	1.0015
Vd5	0.9012	0.00	1.0023	1.0023	0.998	0.9975
Vd6	0.9358	0.98	0.9875	0.9842	0.981	0.9967
Ploss	0.1151	0.0888	0.0880	0.0886	0.892	0.0876

由表 2 的结果对比分析可见，与 LP、Box、MTSA、GA 方法相比，本文算法能搜索到更好的优化解，优化后的系统网络损耗等各项性能指标均优于其它 4 种方法。且本文算法的收敛性好、收敛速度快、能在较少的迭代代数内收敛到与其它算法用较多迭代次数才能找到的解相近甚至更好的解，节省了计算时间。

4.3 IEEE14 节点算例

IEEE14 节点系统数据及接线图见文献[6]，该系统包括 2 条发电机母线及 20 条支路，其中 3 条支路：(5, 6) (4, 7) 和 (4, 9) 为变压器支路，可调变比范围均为 $\pm 8 \times 1.25\%$ ；母线 3、6、8 装有并联无功补偿装置。对系统进行无功优化计算，算法参数选择同 IEEE6 节点系统。发电机节点电压 V_G

可连续变化, 变压器变比 T_k 的调节步长为 0.0125, 补偿容量 Q_C 的调节步长为 0.01。网络初始状态为: 各发电机母线电压为 1.0、各变压器变比为 1.0、各补偿器值为 0。限于篇幅, 本文仅给出优化后的网损; 优化前初始网损为 17.85 WM, 优化后的结果为 12.45 WM, AFSA 方法优化后结果为 12.51 WM。文献[7]中广义蚁群算法优化结果为 12.55 WM, 本文算法略优。

5 结论

无功优化在电力系统经济运行中占有重要地位, 对其进行研究具有重要意义。人工鱼群算法是一种新的随机搜索优化算法。它通过并行运算寻优, 可以用来解决一些非凸、非线性及离散的优化问题, 为一些优化问题的解决提供了一条新的思路。本文尝试将其改进后应用到电力系统无功优化中来, 通过对 IEEE6、14 节点系统的仿真分析表明, 本文的算法搜索性能好, 能在较短的搜索时间内找到全局最优解, 表明了本文算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 许文超, 郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 100-104.
XU Wen-chao, GUO Wei. Summarize of Reactive Power Optimization Model and Algorithm in Electric Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2003, 15(1): 100-104.
- [2] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优方式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22: 32-38.
LI Xiao-lei, SHAO Zhi-jiang, QIAN Ji-xin. An Optimizing Method Based on Autonomous Animals: Fish-swarm Algorithm[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2002, 22: 32-38.
- [3] 李晓磊, 钱积新. 基于分解协调的人工鱼群优化算法研究[J]. 电路与系统学报, 2003, 8(1): 1-6.
LI Xiao-lei, QIAN Ji-xin. Studies on Artificial Fish Swarm Optimization Algorithm Based on Decomposition and Coordination Techniques[J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(1): 1-6.
- [4] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于人工鱼群算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2004, 32(9): 9-12.
TANG Jian-dong, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, et al. Reactive Power Optimization of Power System Based on Artificial Fish-Swarm Algorithm[J]. Relay, 2004, 32(9): 9-12.
- [5] 王洪章, 熊信银, 吴耀武. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 15-18.
WANG Hong-zhang, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Power System Reactive Power Optimization Based on Modified Tabu Search Algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 15-18.
- [6] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Analysis of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [7] 林昭华, 侯云鹤, 熊信银, 等. 广义蚁群算法用于电力系统无功优化[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(2): 6-9.
LING Zhao-hua, HOU Yun-he, XIONG Xin-yin, et al. Generalized ant Colony Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization in Power Systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(2): 6-9.

收稿日期: 2007-09-27

作者简介:

刘耀年(1951-), 男, 教授, 研究方向为配电网自动化、人工智能等方面的研究工作;

范为(1981-), 女, 研究生, 研究方向为电力系统无功优化; E-mail: fan.tastic@163.com

韩立国(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统无功优化。

(上接第 19 页 continued from page 19)

- HUANG Huai-tui. Analyzing and Treating with Malfunction of Fiber Optic Protection Channel[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(16): 11-13.
- [5] 李瑞生, 王强, 文明浩, 等. WXH-803 光纤电流差动保护的研究[J]. 继电器, 2004, 32(2): 40-43.
LI Rui-sheng, WANG Qiang, WEN Ming-hao, et al. Study of WXH-803 Current Differential Protection Based on Optical Fibre[J]. Relay, 2004, 32(2): 40-43.

收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2007-10-10

作者简介:

张太升(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护的研究; E-mail: zhaoyicqu@163.com

郝安河(1952-), 男, 高级工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理工作;

赵一(1982-), 男, 硕士, 从事电力系统方面的研究。