

基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化

赵义术, 李磊, 王大鹏

(山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘要: 提出了一种基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化算法。细菌群体趋药性引入了群体信息交互策略, 使得单个细菌在利用自身信息随机移动的同时, 通过种群的信息交互, 有效地改善了个体移动时的随机性和盲目性, 加强了细菌趋于最优的移动策略。建立了基于细菌群体趋药性的无功优化数学模型, 并对标准 IEEE-6 和 IEEE-30 节点测试系统进行了无功优化计算, 通过结果分析表明, 细菌优化算法在解决电力系统无功优化问题上, 具有很好的应用前景。

关键词: 电力系统; 无功优化; 细菌优化; 群体趋药性

Power system reactive power optimization based on the bacterial colony chemotaxis

ZHAO Yi-shu, LI Lei, WANG Da-peng

(Shandong Electric Power Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: A bacterial colony chemotaxis is presented to deal with reactive power optimization problem in power system. This optimization algorithm is used to optimize the target function by analogy to the way bacteria react to chemo-attractants in concentration gradients. The modeling of reactive power optimization is established to apply to the IEEE 6-bus and IEEE 30-bus system respectively, and the results are acceptable. The simplicity and robustness of the process of bacterial colony chemotaxis suggest a research direction which is worth to move on.

Key words: power system; reactive power optimization; bacterial optimization; bacterial colony chemotaxis

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)16-0050-05

0 引言

电力系统实现无功功率的优化调度与控制可以有效地改善电力系统的电压质量, 减少系统有功损耗和提高电压稳定性。无功优化的基本内容是在满足各种约束条件下利用无功控制手段, 如控制发电机和无功补偿设备的无功出力及调整可调变压器的分接头等, 来降低系统有功损耗, 提高系统电压水平。在数学上, 它是一个复杂的多目标、多约束、非线性、非连续、混合整数优化问题。对这一复杂优化问题, 目前已有多种研究和分析方法, 如: 线性规划法、非线性规划法、二次规划、同伦内点法、混合整数法等^[1-4]。每一方法都有一定的优越性和适应性, 但均存在求解时间长、在进行大规模的优化计算时易产生“维数灾”、不能保证得到最优解的不足。

近年来, 有很多根据仿生学原理的启发式优化算法逐渐得到开发与重视, 如遗传算法^[5]、模糊

算法和粒子群算法^[6,7], 这些基于群体智能的优化方法对于解决多峰、非连通、甚至难以建立数学模型的优化问题有着很好的效果, 并逐渐在电力系统设计、调度和控制等方面走向应用。

基于细菌趋药性 BC (Bacterial Chemotaxis) 的优化方法也是一种从生物行为中获得灵感的优化方法。2002 年, 美国人 Muller 综合了 Berg, Brown 和 Bremermann 等人的研究成果, 提出了细菌趋药性 (BC) 算法^[8, 9]。文献[10]在 BC 算法的基础上, 进一步提出了基于细菌群体趋药性的 BCC (Bacterial Colony Chemotaxis) 算法。在 BCC 算法中, 细菌不再是一个单一的个体, 而是一个细菌的种群。

本文建立了基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化数学模型, 并提出了一种基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化算法。最后通过两个经典的 IEEE-6 和 IEEE-30 节点测试系统验证了该算法在电力系统无功优化中应用的可行性和有效性。

1 BCC 算法

1.1 单个细菌移动描述

细菌在营养剂或引诱剂环境下, 会进行相应的反应活动, 收集信息, 进行移动, 在移动过程中不断修正方向和步长, 找到环境中最有营养的位置。

细菌对营养剂或引诱剂的反应运动遵守如下的假设:

- 细菌的运动轨迹是由连续的一系列线段组成, 并且由运动方向和移动距离两个参数决定;
- 细菌在进行下一步移动要改变方向时, 向左转和向右转的概率相同;
- 细菌在各段相邻轨迹间的夹角由概率分布来决定。

假设细菌处在一个 n 维空间中, 可根据如下的步骤一至步骤三对单个细菌的移动行为进行建模:

步骤一: 系统参数设定

在整个算法中, 当期望的计算精度 ε 给定后, 可以得到如式 (1) ~ (3) 所示的 T_0 、 b 、 τ_c 三个系统参数。

$$T_0 = \varepsilon^{0.30} \cdot 10^{-1.73} \quad (1)$$

$$b = T_0 \cdot (T_0^{-1.54} \cdot 10^{0.60}) \quad (2)$$

$$\tau_c = \left[\frac{b}{T_0} \right]^{0.31} \cdot 10^{1.16} \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 是由细菌运动轨迹方程线性回归统计得到的, T_0 是与计算精度有关的参数, τ_c 是与细菌运动方向转角大小相关的时间, b 是与维数无关的参数。

步骤二: 细菌移动方向的选择

当细菌移动时, 用移动步长和移动方向, 即一个半径 r 和 $(n-1)$ 个角度 $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ 来描述其移动的状态。其中: r 表示细菌在 n 维空间中移动的综合步长; $(n-1)$ 个角度 $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ 表示细菌在 n 个维度中相邻维度两两组合所构成的平面内的移动角度, 即把细菌的 n 维移动转化成 $(n-1)$ 个二维移动, 这 $(n-1)$ 个移动角度综合叠加的结果就是细菌完成了在整个 n 维空间中的移动方向选择。

设 i ($i=1, 2, \dots, n$) 为维度编号, 细菌移动新方向的确定是用角度 φ_i 在 $(i, i+1)$ 这个二维空间内的高斯概率密度分布, 其中 φ_i 从 i 轴测量, 向左或向右取角度值, 分别依据如下概率分布:

$$P(X_i = \varphi_i, v_i = \mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi_i - v_i)^2}{2\delta_i^2} \right]$$

$$P(X_i = \varphi_i, v_i = -\mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi_i - v_i)^2}{2\delta_i^2} \right] \quad (4)$$

φ_i 的范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 向左或向右的确定按照一个式 (5) 所示的统一的概率密度分布^[7]:

$$P(X_i = \varphi) = \frac{1}{2} [P(X_i = \varphi, v_i = \mu) + P(X_i = \varphi, v_i = -\mu)] \quad (5)$$

期望 $\mu = E(X)$ 和方差 $\delta = \text{Var}(X)$ 分别按如下的方式给定:

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0,$$

$$\mu = 62^\circ (1 - \cos \theta) \quad (6)$$

$$\delta = 26^\circ (1 - \cos \theta) \quad (7)$$

$$\cos \theta = e^{-\tau_c \tau_{pr}} \quad (8)$$

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} > 0,$$

$$\mu = 62^\circ, \delta = 26^\circ \quad (9)$$

式中: f_{pr} 为当前点和上一个点的函数值的差; l_{pr} 为变量空间中连接当前点和上一个点的向量的模; τ_{pr} 为细菌上一运动轨线的持续时间。它不是直接作为决定移动效果的控制量, 而是作为一个关系到移动方向的调整参数, 即上一步中的参数 τ , τ 由式 (10) 所示的概率分布决定:

$$P(X = \tau) = \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (10)$$

$$T = \begin{cases} T_0, & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \geq 0 \\ T_0 \left(1 + b \left| \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \right| \right), & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

一旦 φ_i 确定, 就可以得到一个新的规格替代矢量 \vec{n}_u 。为获得这个矢量, 我们把新确定的角 $(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1})$ 与以前的移动角求和。

步骤三 移动步长的确定

在 n 维空间中定义一个位置坐标 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 则这个坐标向量可以唯一描述一个细菌在空间中的位置。

我们把细菌在 n 维空间中的移动步长分别用 (x_1, x_2, \dots, x_n) 表示。

这个位置在 n 维空间定义如下:

$$x_1 = r \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \cos(\varphi_k);$$

$$x_i = r \cdot \sin(\varphi_{i-1}) \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \cos(\varphi_k), \quad i = 2, \dots, n-1;$$

$$x_n = r \cdot \sin(\varphi_{n-1}) \quad (12)$$

τ_{pr} 、 f_{pr} 、 l_{pr} 均为上一步移动信息。

1.2 细菌群体信息交互模式描述

在现实世界中,细菌是以群体的形式存在的。在细菌群体中,细菌个体之间也通过某种方式相互联系,通过各种方式交换信息。使用同伴提供的信息,细菌将能够大大扩展对于环境的了解从而能增加存活的几率。

假定细菌个体间进行联系的方式如下:

a. 假定每一个细菌都有一定的感知范围,在这个范围内细菌可以感知其它细菌以及它们的状态,得到相应信息。假定每个细菌都有全局的感知范围。

b. 假定每个细菌都有一定的智能可根据它感知范围内其它细菌的信息来调整移动的方式。

根据以上两个假设,以下步骤四至步骤八进一步描述了细菌在群体环境中移动时的行为。

步骤四: 其他更优点中心坐标的确定

在每次移动到新位置之前,细菌都要感知它周围的环境,试探旁边是否有其他位置更好的细菌。如果有,那么它有可能趋向移动到这些拥有较好位置细菌的中心点。在移动步数为 k 时细菌 i 附近有更好位置的同伴的中心点由下式决定:

$$center(\bar{x}_{i,k}) = Aver(\bar{x}_{j,k} | f(\bar{x}_{j,k}) < f(\bar{x}_{i,k})); \quad (13)$$

式中:

$$Aver(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = \left[\sum_{i=1}^n \bar{x}_i \right] / n, i, j = 1, 2, \dots, n,$$

$dis(\bar{x}_{j,k}, \bar{x}_{i,k})$ 为 n 维空间中细菌 i 和细菌 j 之间的距离;

步骤五: 向中心坐标移动

如果一个细菌趋向移动到它周围同伴的中心位置,那么移动的步长可以表示为 $rand() \cdot dis(\bar{x}_{i,k}, center(\bar{x}_{i,k}))$,式中符号 $rand()$ 为(0, 2)之间服从均匀分布的随机值。

在 n 维空间每个维度中,细菌的移动步长同样是与本维度的单位和量纲相匹配的。

步骤六: 个体和群体移动结果比较

比较细菌在 n 维空间中的个体和群体移动结果,择优保留,并作为下一步移动的信息依据。

步骤七: 改进策略

由于BCC算法是一种随机优化算法,为了进一步提高算法性能,避免由于算法的随机性而将原来位置较好的点抛弃的情况,引入改进策略。即菌群每移动一步后,位置最差的细菌将继续移动到菌群整体移动前位置最好的细菌所处的位置附近,即:

$$\bar{x}_{worst} = \bar{x}_{worst} + rand() \cdot (\bar{x}_{best} - \bar{x}_{worst}).$$

步骤八: 参数更新

当细菌寻优结果满足跳出迭代输出结果的条件时,则完成优化结束;反之则根据本步移动结果确定提供给下一步移动的信息,并进行参数更新。

在优化过程中对算法参数的自适应调整更新可加速寻优过程,采用全体参数的自适应更新后,细菌在搜索初期,当初始精度较低时,移动的步长较大,可以避免在局部范围过多地耗费时间;同时,在搜索的后期,当细菌已经到达最优值范围附近时,细菌的移动步长将会缩短,保证了算法最后能趋近最优值。

综上所述,细菌在 n 维空间中的个体和群体移动规律,就构成了完整的BCC算法体系。

2 细菌群体趋药性无功优化算法

2.1 电力系统无功优化问题的模型

电力系统无功优化问题是一个多变量、非线性、多约束的组合优化问题,其控制变量既有连续变量(如节点电压),又有离散变量(如有载调压变压器分接头挡位、补偿电容器的投切组数),使得优化过程十分复杂^[7]。进行无功优化计算一般要对发电机端电压、可调变压器变比、节点补偿无功作综合调整,通常建立如下以系统有功网损最小为目标的数学优化模型:

$$\min f(x_1, x_2) = \min(P_{Loss}) \quad (14)$$

满足式(15)和式(16)的约束:

$$P_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$i \in N_g, i \neq s \quad (15)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$i \in N_{pq}$$

$$\begin{cases} V_{Gmin} \leq V_G \leq V_{Gmax} \\ K_{Tmin} \leq K_T \leq K_{Tmax} \\ Q_{Cmin} \leq Q_C \leq Q_{Cmax} \\ V_{Lmin} \leq V_L \leq V_{Lmax} \\ Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax} \\ S_L \leq S_{Lmax} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $x_1 \in R^n$ 且 $x_1 = [V_G, K_T, Q_C]$ 为控制变量,分别指发电机机端电压,有载调压变压器变比和无功补偿容量; $x_2 \in R^n$ 且 $x_2 = [V_L, Q_G, P_{ref}]$ 为状态变量,分别是负荷节点电压,发电机无功出力 and 平衡节点的有功出力; N_{pq} 是所有PQ节点的集合; S_L 是支路通过的功率。

综合考虑目标函数和约束条件, 本文以式(17)作为粒子群体优化的目标函数。

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2) = & \min(P_{\text{Loss}} \\ & + \lambda_1 \sum_{\alpha} \left(\frac{V_i - V_{i\text{lim}}}{V_{i\text{max}} - V_{i\text{min}}} \right)^2 \\ & + \lambda_2 \sum_{\beta} \left(\frac{Q_i - Q_{i\text{lim}}}{Q_{i\text{max}} - Q_{i\text{min}}} \right)^2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: λ_1, λ_2 分别为违反电压约束和发电机无功出力约束的惩罚因子; α, β 分别为违反节点电压约束和违反发电机无功出力约束的节点集合; $V_{i\text{lim}}, Q_{i\text{lim}}$ 分别为第 i 节点电压和无功的限值; $V_{i\text{max}}, V_{i\text{min}}$ 分别为节点电压 V_i 的上限和下限; $Q_{i\text{max}}, Q_{i\text{min}}$ 则分别为发电机节点的无功出力 Q_i 的上限和下限。

2.2 细菌群体趋药性的无功优化算法步骤

a. 初始化。输入控制变量(发电机机端电压, 有载变压器抽头和可调电容器)的维数和上下限值, 设定状态变量(PQ节点电压, 发电机无功出力及平衡节点的有功出力)的限值; 设置细菌群体的规模、最大迭代次数等参数。

b. 单个细菌分别独立移动, 调用潮流计算程序, 计算有功网损, 即得到移动结果。

c. 细菌寻找并采集群体中周围细菌的位置信息进行移动, 调用潮流计算程序, 计算有功网损。

d. 比较二者的计算结果, 选择较优者, 即有功网损较小者作为本步的移动结果, 同时作为下一步移动的位置信息依据。

e. 判断是否达到精度或达到迭代步数, 之后选择输出结果或继续迭代。

将无功优化目标函数作为细菌算法的优化目标函数, 并把无功优化的控制变量作为维度与细菌优化算法的维度相对应, 即实现了细菌优化算法在无功优化问题中的应用。

3 应用测试

分别以 IEEE-6 和 IEEE-30 节点经典系统作为测试用例, 对本文提出基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化模型及优化算法进行验证。IEEE-6 系统数据见文献[11], 该系统包含两台发电机和两台可调变压器, 两个无功补偿节点(节点 4 和节点 6), 系统有功负荷为 135 MW, 无功负荷为 36 Mvar。IEEE-30 系统包含六台发电机, 4 台可调变压器及 9 个无功补偿节点^[12], 系统有功负荷 284.2 MW, 无功负荷 126.2 Mvar。两个系统的参数的基准容量均

为 100 MVA。选取细菌个数 20 个, 初始精度为 10^{-4} , 在优化计算过程中, 潮流计算采用基于 Matlab 语言 MatPower 软件包的 Newton-Raphson 法。以 BCC 算法和遗传算法(SGA)分别进行无功优化计算, 计算结果如表 1 所示。

表 1 测试用算例的计算结果

算例	初始网损 /MW	计算时间/s		优化后网损 /MW		降损率/(%)	
		BCC	SGA	BCC	SGA	BCC	SGA
IEEE-6	10.80	69	124	8.88	8.98	17.78	16.85
IEEE-30	8.454	112	218	6.87	7.01	18.74	17.08

注: 网损率 = (初始网损 - 优化后网损) / 初始网损 × 100

由表 1 中的计算结果可见, 使用遗传算法进行无功优化计算时, IEEE-6 和 IEEE-30 节点两个测试用算例的计算时间分别为 124 s 和 218 s, 有功网损的降损率分别为 16.85% 和 17.08%。而使用 BCC 算法进行无功优化计算时, IEEE-6 和 IEEE-30 节点两个测试用算例的计算时间分别为 69 s 和 112 s, 比遗传算法的计算速度快。有功网损的降损率分别为 17.78% 和 18.74%, 优于遗传算法的降损率。可见, 使用 BCC 算法计算电力系统无功优化问题与使用遗传算法计算相比, BCC 方法能搜索到更好的优化解, 具有更高的搜索效率。

4 结论

BCC 算法由于采用了寻优过程中的细菌群体交互模式而大大提高了细菌的寻优能力, 并且继承了 BC 算法中的变尺度搜索的优点, 从而具备了获取较高精度极值的良好性质。通过两个 IEEE 典型测试系统的计算及结果分析表明, BCC 算法在解决电力系统无功优化问题时具有快速、高效、准确的优点, 是解决电力系统无功优化问题的一种新途径, 值得在理论上和实践上加以进一步的研究和探索。

参考文献

- [1] Kenji Iba. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 685 - 692.
- [2] Gaing Zwe-Lee. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.
- [3] Naka, S, Genji T, Yura T, et al. Practical Distribution State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization[A]. In: IEEE Power Engineering Society

- Winter Meeting[C]. Perth (Australia):2001. 815-820.
- [4] Fukuyama, Y, Yoshida H. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control in Electric Power Systems[A]. In:Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul (South Korea):2001. 87 -93.
- [5] 倪伟, 单渊达. 具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (21) : 40-44.
NI Wei, SHAN Yuan-da. A Refined Genetic Algorithm With Optimal Searching Path Used in Power System Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (21) :40-44.
- [6] 陈星莺, 钱锋, 杨素琴. 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用[J]. 电网技术, 2003,27(2):68-71.
CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin. Application of Fuzzy Dynamic Programming Approach to Optimal Reactive Control in Distribution System[J]. Power System Technology, 2003,27(2):68-71.
- [7] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2005, 25(7): 57-61.
LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. Optimal Reactive Power Dispatch Using Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25(7): 57-61.
- [8] H. C. Berg, D. A. Brown. Chemotaxis in Escherichia Coli Analyzed by Three-dimensional Tracking[J]. 1972.500-504.
- [9] Bremermann H J. Chemotaxis and Optimization[M]. 1974: 397-404.
- [10] 李威武, 王慧, 邹志君, 等. 基于细菌群体趋药性的函数优化方法[J]. 电路与系统学报, 2005, 1:58-63.
LI Wei-wu, WANG Hui, ZOU Zhi-jun, et al. Function Optimization Method Based on Bacterial Colony Chemotaxis[J]. Journal of Circuits and Systems, 2005, 1:58-63.
- [11] ZHANG Hai-bo, ZHANG Li-zi, MENG Fan-ling. Reactive power optimization based on genetic algorithm[A]. In:1998 International Conference on Power System Technology[C]. Beijing (China): 1998.1448-1453.
- [12] 刘明波, 李健, 吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002,22 (1) :2-8.
LIU Ming-bo, LI Jian, WU Jie. Nonlinear Homogeneous Interior-point Method for Reactive-power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1):2-8.

收稿日期: 2007-01-26; 修回日期: 2007-03-10

作者简介:

赵义术 (1975-), 男, 博士, 从事电力系计算分析工作; E-mail:zhaoyishu75@sohu.com

李磊 (1974-), 男, 副教授, 从事电力系计算分析工作;

王大鹏 (1970-), 女, 副教授, 从事电力系计算分析工作。

(上接第 49 页 continued from page 49)

- [5] 郭卉. 改进遗传算法在牵引变压器优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 4(2):119-123.
GUO Hui. Application of Modified Genetic Algorithm to the Optimum Design of Traction Transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 4(2):119-123.
- [6] 张勇军, 任震, 钟红梅. 实时无功优化调度中的邻域搜索改进遗传算法[J]. 电网技术, 2003, 27(1):22-25.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, ZHONG Hong-mei. An Improved Genetic Algorithm with Neighborhood Search for Real Time Optimal Reactive Power Dispatch[J]. Power System Technology, 2003, 27(1):22-25.
- [7] 戴雯霞, 吴捷. 无功功率优化的改进退火选择选择传算法[J]. 电网技术, 2001, 25(11):33-37.
DAI Wen-xia, WU Jie. A Modified Genetic Algorithm with Annealing Selection for Reactive Power Optimization[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 33-37.
- [8] 夏可青, 等. 基于自适应遗传算法的多目标无功优化[A]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十一届学术年会论文集[C]. 2005.766-770.
- [9] 熊信良, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2007-04-19; 修回日期: 2007-06-30

作者简介:

蔺红 (1969-), 女, 讲师, 主要从事电力系统稳定性分析研究及智能化控制研究与教学; E-mail:tseagle@163.com

晃勤 (1959-), 女, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术与教学。