

基于细菌群体趋药性算法的暂态稳定预防控制

余建国¹, 肖文龙¹, 李 潘¹, 吴可梦¹, 张鹏宇², 马 波¹

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 西华大学机械工程学院, 四川 成都 610039)

摘 要: 针对电力系统安全运行中的暂态稳定性预防控制问题, 以预防控制中的总调整费用最小为目标函数, 建立了预防控制数学模型。将一种新型的群体智能优化算法——细菌群体趋药性算法应用于该模型的优化求解。该算法通过优化参数, 加快了收敛速度, 解决了暂态稳定预防控制中鲁棒性和快速性问题。仿真结果表明: 该方法符合 IEEE 39 节点测试系统的要求, 估计精度能够满足实际工程需要。

关键词: 暂态稳定; 预防控制; BCC 算法; 电力系统; 智能优化

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2016)02-0005-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2016.02.002>

Prevention and control of transient stability in power system based on bacterial colony chemotaxis algorithm

YU Jianguo¹, XIAO Wenlong¹, LI Pan¹, WU Kemeng¹, ZHANG Pengyu², MA Bo¹

(1. School of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu Sichuan 610039, China)

Abstract: Aiming at the prevention and control issues for the transient stability of power system safe operation, taking the total adjustment cost minimum as the objective function for prevention and control, establishes the prevention and control mathematical model. Applies a new type of swarm intelligence optimization algorithm——bacterial colony chemotaxis algorithm optimizing solution of the model. Through the optimization of parameters and accelerating convergence rate, this algorithm solves the problem of robustness and rapidity in transient stability preventive control. The simulation result shows that this algorithm meets the requirement of IEEE 39 node testing system and estimate accuracy can satisfy the actual needs of the project.

Key words: transient stability; prevention and control; BCC algorithm; power system; intelligent optimization

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2016.02.002

收稿日期: 2016-02-01

作者简介: 余建国(1994), 男, 从事电力系统仿真技术研究。

随着电力工业的快速发展^[1-4]和电力系统市场化运营的广泛实施,电网的整体规模不断扩大,运行方式也越加复杂,电力系统安全经济运行中由暂态稳定引起的技术困难越来越多,因此对电力系统暂态稳定进行预防控制已经刻不容缓^[5-8]。预防控制指在故障发生之前采取有效的措施对系统的网络结构或者潮流分布进行相应的调整^[6],从而达到提升系统应对某些故障的能力,这种方式是系统暂态稳定控制最有效的方法之一。

1 现状分析

暂态稳定预防控制问题目前主要存在两个难题,一个是运算量大;另一个是判断故障切除时刻系统状态是否在稳定域内。为了克服以上两个难点,很多学者做了大量的研究工作。文献[9]提出结合动态安全数据库系统进行在线预防性安全调控的方法,该方法实现起来较繁琐。文献[10]基于时域仿真得到系统受扰轨迹,给出了暂态稳定预防控制的模型,但是没有提出具体的方法。文献[11]提出了一种基于发电量最优分配理论的预防控制新方法,由于在发电机出力极限的求取过程中严格地采用了各极限区间的交集,致使预防控制最优解的求解过程可能会陷于局部最优,因此怎样寻找全局最优解成为了一个值得研究的问题。

2 解决方案

近些年来,源自于大自然生物过程的启迪,发展出了很多求解实践问题的智能优化算法^[12-15],如蚁群算法,粒子群算法等,本文引用了一种新的改进的智能算法——细菌群体趋药性(Bacterial Colony Chemotaxis, BCC)算法,利用此算法来解决电力系统暂态稳定预防控制中的系统参数优化问题,可以很好地预防系统发生故障,使系统能够安全经济运行。

2.1 算法设计

BCC算法是在结合细菌趋药性(BC)算法与种群优化算法基础上发展而来的,利用单个细菌不断感受周围环境的变化且向最优位置移动的能

力来进行寻优,提高了全局的搜索能力。该算法比其它群体智能算法具有更强的局部搜索能力且占用更少的系统资源,该算法的步骤描述如下:

步骤1:确定细菌个数,初始位置,初始收敛精度,最终收敛精度。按BC算法确定系统参数 T_0 、 τ_0 、 b ^[16]。

步骤2:确定细菌的移动方向和移动步长。

每个细菌移动时,用其移动步长和移动方向即半径 r 和 $n-1$ 维角度向量 $\lambda=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1})$ 来描述其移动的状态。这 $n-1$ 个移动角度综合叠加的结果就是细菌在整个 n 维空间中的移动方向选择的结果。

设 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 为维度编号,细菌移动新方向是用角度 λ_i 在 $(i, i+1)$ 这个二维空间内的高斯概率分布确定的,其中 λ_i 从 i 轴测量,向左或向右取角度值,分别服从概率分布如式(1)。

$$\begin{cases} P(X_i=\lambda_i, v_i=+\mu_i)=\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\lambda_i-v_i)^2}{2\delta_i^2}\right] \\ P(X_i=\lambda_i, v_i=-\mu_i)=\frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(\lambda_i-v_i)^2}{2\delta_i^2}\right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ν, μ, X —标准高斯概率密度分布参数。

λ_i 的范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$,运动方向向左或者向右由式(2)所示的统一的概率密度分布确定。

$$P(X_i=\lambda_i)=\frac{1}{2}[P(X_i=\lambda_i, v_i=\mu_i)+P(X_i=\lambda_i, v_i=-\mu_i)] \quad (2)$$

X 的期望 $\mu=E(X)$ 和方差 σ 由如下的方式决定:设 f_{pr} 为当前点与上一个点函数值之差; l_{pr} 为变量空间中连接当前点和上一个点的向量的模。

若

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

$$\text{则 } \mu=62^\circ(1-\cos\theta) \quad (3)$$

$$\sigma=26^\circ(1-\cos\theta) \quad (4)$$

其中: $\cos\theta=\exp(-\tau, \tau_{pr})$;

若

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

$$\text{则 } \mu=62^\circ, \sigma=26^\circ \quad (5)$$

式中: τ_{pr} —细菌上一运动轨线持续时间的随机参数。

参数 τ 由概率分布决定:

$$P(X=\tau)=\frac{1}{T}e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (6)$$

参数 T 由式(7)决定:

$$T = \begin{cases} T_0, \frac{f_{pr}}{I_{pr}} \geq 0 \\ T_0 \left(1 + b \left| \frac{f_{pr}}{I_{pr}} \right| \right), \left| \frac{f_{pr}}{I_{pr}} \right| \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

一旦确定了 λ_i , 把新确定的角 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1})$ 与以前的移动角求和, 就可以得到一个新的描述移动轨迹的方向向量。

步骤 3: 对处在移动步数 k 的细菌 j , 感知其周围的环境, 试探其周围是否有其他更好的细菌。如果有, 确定它们的中心点 $Center(x_{j,k})$ 和一个假定的朝这个中心方向移动的长度 $rand() \cdot dis(x_{j,k}, Center(x_{j,k}))$, 确定位置。

步骤 4: 对于处在移动步数 k 的细菌 j , 根据它自己记忆的上几步的位置信息, 按 BC 算法确定在步数 $k+1$ 时的新位置 $x''_{j,k+1}$ 。

步骤 5: 计算位置 $x'_{j,k+1}$ 和 $x''_{j,k+1}$ 的函数值, 如果 $f(x'_{j,k+1}) < f(x''_{j,k+1})$, 那么细菌就在 $k+1$ 步的时候移向点 $x'_{j,k+1}$, 不然反之移向点 $x''_{j,k+1}$ 。

步骤 6: 重复步骤 3 至步骤 5, 直至满足终止条件为止。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发生, 引入精英保留策略, 并随时更新参数。

2.2 系统结构

2.2.1 预防控制模型

对 n 机系统, 以预防控制代价最小为目标, 建立预防控制的数学模型。

目标函数

$$C = \min \sum_{i=1}^n K_i \Delta P_{x,i} \quad (8)$$

约束条件

$$\sum_{i=1}^n (\Delta V_{p_m,j} \Delta P_{x,i}) \geq V_{req} - V_j \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{x,i} = 0 \quad (10)$$

$$P_{x,i}^{min} \leq \Delta P_{x,i} + P_{x,i} \leq P_{x,i}^{max} \quad (11)$$

式中: C —调整费用;

i —参与优化的发电机个数, $i=1, 2, \dots, n$;

K_i —发电机 i 的单位调整费用;

$P_{x,i}$ —发电机 i 有功输出实际值;

$\Delta P_{x,i}$ —发电机有功输出调整量;

$P_{x,i}^{max}, P_{x,i}^{min}$ —分别表示发电机有功输出上下限;

$\Delta V_{p_m,j}$ —严重故障 j 下稳定裕度对发电机 i 有功出力灵敏度, $j=1, 2, \dots, m, m$ 为严重故障个数;

V_{req} —稳定裕度的门槛值;

V_j —故障 j 下的稳定裕度。

以上优化模型是通过降低临界机群的有功出力, 同时增加剩余机群的有功出力, 在不改变负荷的情况下, 使系统从不稳定状态达到稳定的状态。

2.2.2 算法实现

初始化细菌群体, 设细菌个数为 n , 每个细菌携带的信息(即空间坐标维数)由参与发电机的个数 G , 发电机的成本系数 K , 发电机有功出力调节量 P 决定。构成了一个 $n(G+K+P)$ 阶的初始矩阵, 这个初始矩阵中的元素分别对应上述模型中 $n, K_i, \Delta P_{x,i}$ 的值, 求得目标函数值。细菌遵循在 $(G+K+P)$ 维空间中的移动规律即按照上述寻优步骤进行寻优, 寻优过程中根据实际需要, 把负荷平衡, 有功出力上下限, 稳定裕度的门槛值和故障 j

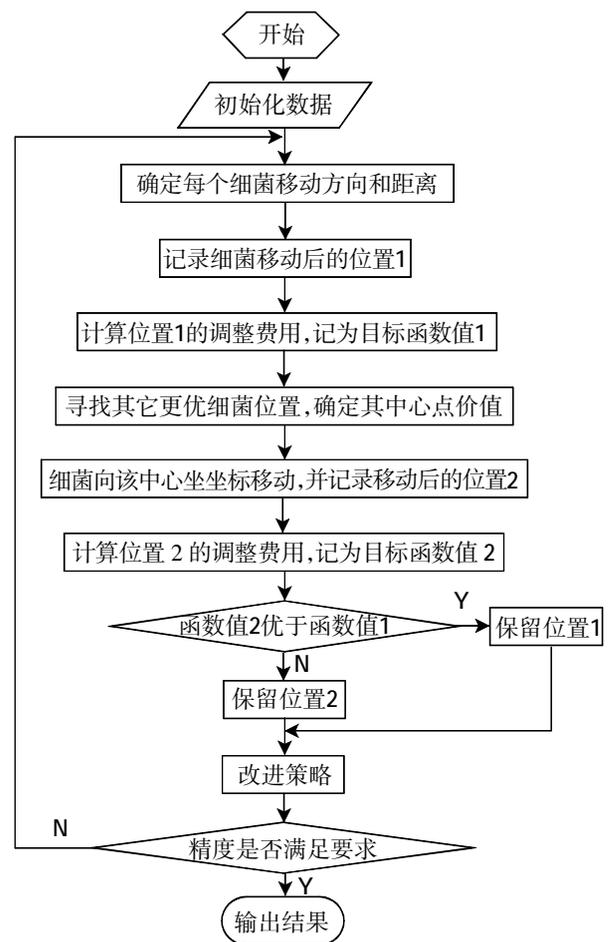


图 1 BCC 算法求解暂态稳定预防控制的流程

下的稳定裕度之差作为约束条件。细菌每移动一步后对结果进行判断,若不符合相应的约束条件,则进行相应的调整,避免不可行的数据产生。由于每一维代表的基准值不同,实际移动距离与相应维度的物理意义、数量级及单位相吻合。优化流程如图1所示。

3 应用算例验证

本文以 IEEE 10 机 39 节点系统为例,图 2 为新英格兰 10 机 39 节点系统接线图。选 39 号节点为系统平衡节点。全网负荷采用 40%恒阻抗,60%恒功率模型。暂态稳定阈值值取为 π ,研究时间为 $[0,5]$ s。细菌个数为 50 个,精度要求为 10^{-1} 。

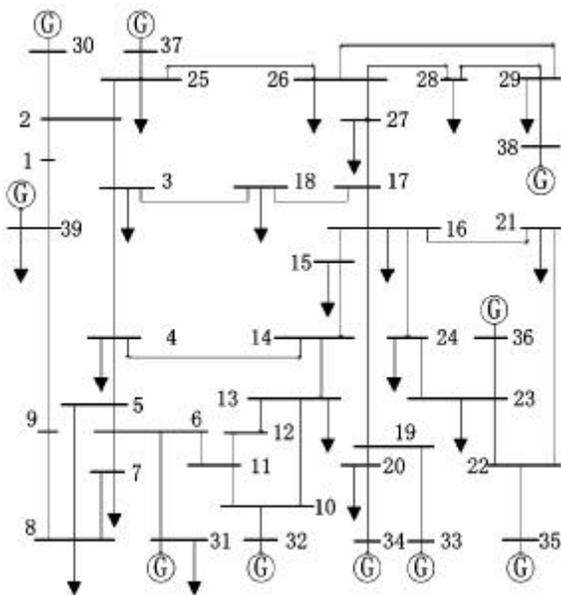


图 2 新英格兰 10 机 39 节点系统接线

为了验证所提方法的正确性,以下面 2 个故障为例:

算例 1,当 23 号母线发生三相短路故障时,在 0.16 s 时快速切除 23-24 号故障线路,记为 L(23-24)。

算例 2,当 28 号母线发生三相短路故障时,在 0.18 s 时快速切除 28-29 号故障线路,记为 L(28-29)。

把 BCC 算法运用到预防控制当中,整个过程利用 C 语言进行编程,得到如表 1 所示的发电机调整结果。

表 1 发电机的调整结果

发电机	基本有功输出/MW	有功输出/MW		算例 1 实际有功输出/MW	算例 2 实际有功输出/MW	成本系数/(美元·h ⁻¹)
		上限	下限			
30	250	400	200	258.7	262.3	9
31	570	700	250	564.3	567.1	8
32	635	750	400	639.1	644.6	6
33	643	800	350	641.4	639.2	10
34	512	650	300	502.6	507.3	5
35	660	750	350	655.2	651.5	7
36	538	700	300	529.5	533.4	8
37	540	700	380	551.2	548.7	6
38	836	900	460	843.6	841.8	7
39	1 010	1 200	650	1 018.7	1 013.9	9

表 1 得出的最后总调整费用可以用式 (7)算出,算例 1 的总费用 C_1 为 511.8 美元,算例 2 的总调整费用 C_2 为 477.2 美元,其值满足暂态稳定约束的最小值。实施预防控制前后两个故障模式下,相对应的系统的暂态功角摇摆曲线如图 3 所示。由图 3 可知施加预防控制后系统的暂态稳定曲线逐渐趋向稳定,证明了所提方法的有效性。图 4 为实施预防控制前后发电机的有功输出情况,从图 4 中可以知道,实施预防控制前后,发电机有功输出调整量很小,就可使目标函数达到最优值。图 5 为在实施预防控制过程中细菌的寻优曲线,从图 5

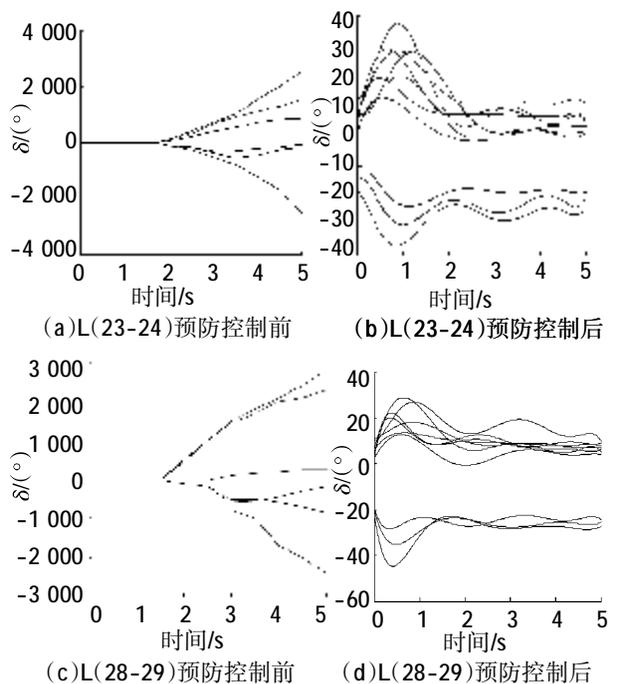


图 3 实施预防控制前后系统的暂态功角摇摆曲线

中可以看出,BCC算法具有很强的收敛性,在迭代次数大约为25次的时候所有的细菌都能趋近最优解,并且能够满足精度要求。

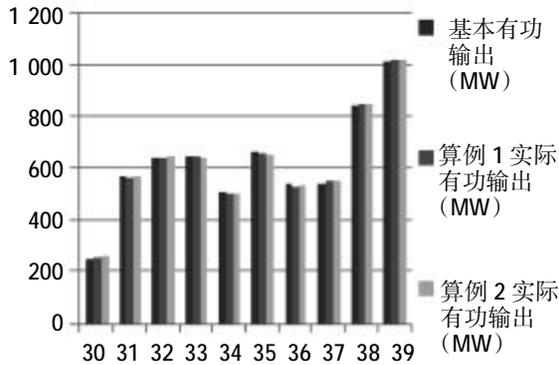


图4 实施预防控制前后发电机的有功输出对比

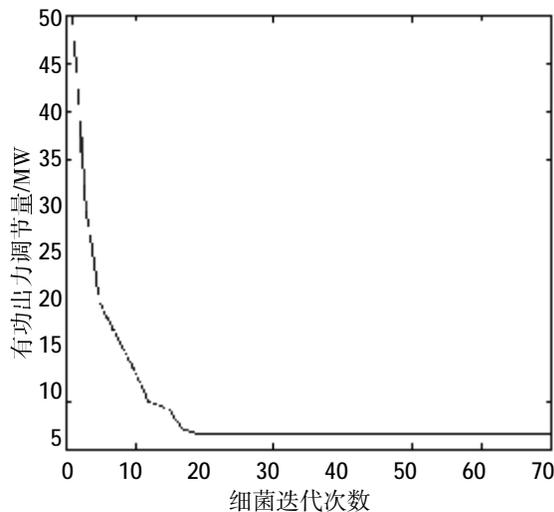


图5 细菌优化收敛曲线

4 结论

(1)本文提出了一种基于细菌群体趋药性算法的暂态稳定预防控制新方法,该方法是利用BCC算法求解预防控制模型,优化模型参数,使系统在满足暂态稳定约束的情况下得到目标函数最优值。

(2)由于BCC算法采用的是细菌群体交互模式,本身具有突破局部最优限制的寻优机制,因此大大提高了细菌的全局寻优能力。

(3)经IEEE 10机39节点系统的仿真分析结果表明,该算法具有很好的收敛速度和计算精度,并且证实了该算法的有效性。

参考文献:

[1] Gungor V C, Lu B, Hancke G P. Opportunities and

challenges of wireless sensor networks in smart grid[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2010, 57(10): 3557-3564.

- [2] 马波, 阳小明, 李天倩, 等. 箭头型超材料模型及其在无线电力传输中的应用[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 47-50.
- [3] 马波, 阳小明, 等. 梯形超材料对微带天线增益指标的改善[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 34-38.
- [4] Ma Bo, Yang Xiao-ming, Li Tian-qian, et al. Gain and directivity enhancement of microstrip antenna loaded with multiple splits octagon-shaped metamaterial superstrate [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2016, 50(1): 201-213.
- [5] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4.
- [6] 孙元章, 杨新林, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化. 2005, 29(16): 56-59.
- [7] 孙景强, 房大中, 周保荣. 基于轨迹敏感度的电力系统动态安全预防控制算法研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 26-30.
- [8] 丁理杰, 陈为化, 包哲静. 基于风险评估的电力系统预防控制[J]. 华东电力, 2009, 37(11): 1826-1831.
- [9] 钟德成, 房大中, 黄杰波, 崔凯. 基于数据库系统的电力系统暂态稳定在线预防性控制算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 40-43
- [10] 孙景强, 房大中. 基于最优控制原理的暂态预防控制模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 18-21.
- [11] 邵振国, 武冠英, 黄道姗. 一种基于发电量优化分配的暂态稳定预防控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 20-24.
- [12] 李秀卿, 孙守鑫, 张超, 等. 基于改进细菌群体趋药性算法的无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 56-59.
- [13] 赵义术, 李磊, 王大鹏. 基于细菌群体趋药性的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2007, 35(16): 50-54.
- [14] 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, 24(1): 58-63.
- [15] 吴蓓, 张焰, 陈闽江. 基于菌群趋药性遗传算法的电压崩溃临界点计算[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(2): 333-336.
- [16] 黄伟, 张建华, 张聪, 等. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 29-33.