

# 基于改进免疫算法的电力系统最优潮流计算

肖力

(鄂州大学计算机系, 湖北 鄂州 436000)

**摘要:** 提出了一种改进的人工免疫算法来计算电力系统最优潮流, 免疫算法是根据人或其它高等动物免疫系统的机理而设计的, 将目标函数和不等式约束条件作为抗原, 将搜索空间的解作为抗体, 依据抗原与抗体的结合力以及抗体之间的结合力对解进行评价和选择, 该算法在保持了基本免疫算法的全面搜索能力基础之上, 又通过引入矢量距等概念及使得免疫算法在理论上保证了解的多样性。通过 IEEE-30 节点系统的计算结果表明该算法是可行的。与遗传算法等模拟进化算法相比, 该算法全局搜索能力强, 收敛速度快。

**关键词:** 最优潮流; 人工免疫算法; 模拟进化算法

## Based on improvement immunity algorithm electrical power system optimal power flow computation

XIAO Li

(Department of Computer Science, Ezhou University, Ezhou 436000, China)

**Abstract:** This paper proposes a kind of improvement artificial immunization algorithm to calculate the electrical power system optimal tidal current. The algorithm, inspired by the immune system of human and other mammals, simulates the process of the interaction between antigens, antibodies and lymphocytes. The implement of artificial immune algorithm on 'OPP' problem is described in the paper. The object function and part of inequality constrains serve as antigen and solution serves as antibody, this algorithm maintains the basic immunity algorithm comprehensive search ability, also the concept which is apart from through the introduction vector causes the immunity algorithm theoretically to guarantee the understanding the multiplicity. Through the IEEE-30pitch point system, computed result indicates this algorithm is feasible. And compared with the heredity algorithm, this algorithm overall situation search ability is strong, the convergence rate is quick.

**Key words:** optimal power flow; artificial immune algorithm; evolutionary algorithm

中图分类号: TM744; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0021-04

## 0 引言

最优潮流 OPF (optimal power flow) 是指在电力系统的结构参数和负荷给定的前提下满足指定约束并使目标函数最优的潮流分布。它是研究电力系统运行和规划方案最重要和基本的手段, 其任务是根据给定的发电运行方式及系统接线方式求解电力系统的稳态运行状况, 包括各母线的电压, 通过各元件的功率等等。

20 世纪 60 年代初, 法国学者 Carpentier 最早提出了最优潮流问题的数学模型。从此人们开始了对电力系统最优潮流的研究。第 1 个实用化的最优潮流算法当归功于 H. W. Dommel 和 W. F. Tinney 提出的简化梯度法<sup>[1]</sup>。此后, 各种基于线性规划和非线性规划求解方法的算法相继被提出。包括简化梯度法、牛顿法、二次规划法、逐次线性规划法、

内点法、基于熵理论的代理约束算法等<sup>[2-5]</sup>。所有这些方法本质上都是利用目标函数对控制变量一阶或二阶梯度求解。当搜索起始点在局部最优点的收敛域以内时, 这些算法常常会陷入局部最优点。

模拟进化算法(包括遗传算法、进化规划和进化策略等)是一种多点随机搜索算法, 与传统的解析法相比, 该算法具有较好的全局搜索能力, 已经应用于电力系统最优潮流计算中<sup>[6]</sup>。模拟进化算法在优化计算方面取得了很大的成功, 但是在实施模拟进化算法时往往面临两个相互矛盾的问题: ①为了避免种群的过早成熟导致收敛于局部最优, 必须加大交叉率和变异率; ②过大的交叉率和变异率导致在最优点附近搜索效率降低。为了解决以上问题, 一些学者提出了一些改进的进化算法, 如多种群进化算法、自适应进化算法等。但这些算法在求解过程中都或多或少存在着不足。

近年来, 免疫算法作为进化算法的一种, 越来越多地应用于非线性混合优化问题, 如将免疫算法

基金项目: 鄂州大学科学研究基金资助(2006005)

应用于电力系统的无功优化、配电网开关优化模型、电网规划等。本文将免疫算法应用于电力系统最优潮流的计算。通过仿真实例结果表明,能有效地避免陷入局部最优解,提高局部搜索能力,加快收敛速度。

## 1 最优潮流的数学模型

电力系统调度运行研究中最常用的最优潮流一般以系统运行成本最小为目标,一般表示为二次多项式的形式<sup>[7]</sup>:

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_G} F(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2)$$

其中:  $P_{Gi}$  为第  $i$  台发电机有功功率出力,  $N_G$  为系统中发电机的总数。

最优潮流考虑的约束条件分为等式约束条件和不等式约束条件两种。

等式约束条件为各节点有功功率和无功功率平衡约束:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \\ \Delta Q_i &= Q_{Gi} - Q_{Li} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \end{aligned}$$

式中:  $N_B$  为网络中节点数目,  $P_{Gi}$  为发电机在节点  $i$  注入的有功功率,  $Q_{Gi}$  为无功电源(包括发电机、同步补偿机等)在节点  $i$  的无功功率,  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别表示在节点  $i$  的有功功率负荷和无功功率负荷,  $V_i$  和  $V_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值,  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的相角差,  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  之间互导纳的实部和虚部。

最优潮流模型中需要考虑的不等式约束比较多,并且根据最优潮流的应用不同所考虑的约束也不同。通常应当考虑的不等式约束包括:

(1) 各发电机有功功率出力上下限:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G$$

(2) 各发电机和同步补偿机无功功率出力上下限约束:

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G$$

(3) 各节点电压幅值上下限约束:

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_B$$

(4) 各支路传输功率约束:

$$\begin{aligned} |P_i| &= |V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})| \leq P_{i \max} \\ i &= 1, 2, \dots, N_B, \quad j = 1, 2, \dots, N_B \end{aligned}$$

在上述各式中,  $N_B$  为网络中节点的数目,  $N_G$  为其中发电机节点的数目,  $P_{Gi \max}$  与  $P_{Gi \min}$  分别为有功功率出力上下限,  $Q_{Gi \max}$  与  $Q_{Gi \min}$  分别为无功功率出力上下限,  $V_{i \max}$  与  $V_{i \min}$  分别为节点电压上下限,  $P_{i \max}$  为支路传输功率上限。

## 2 算法实现

### 2.1 产生抗体群

首先将控制变量编码为抗体,根据控制变量的范围随机产生一定规模的初始抗体。抗体基因编码采用实数编码,这样有利于处理大规模的优化问题。将各发电机节点(除平衡节点)的有功注入  $P_{Gi}$  和电压  $U_i$  (或无功注入  $Q_{Gi}$ ) 作为控制变量,平衡节点电压也作为控制变量。编码时将控制变量编码为抗体,通过潮流计算处理可以获得其它所有变量。

### 2.2 抗原亲和力的计算

抗原与抗体相互作用的强度(匹配程度)称为亲和力,它反应了候选解的好坏程度,抗体与抗原之间的亲和力可以由目标函数的某种变换给出,具体来说,本算法取目标函数的相反数:

$$A = -f(x)$$

这里的目标函数为考虑不等式约束的增广目标函数,由于控制变量的上下界不等式约束在抗体基因编码的过程就可以保证,变量的等式约束通过潮流计算过程可以保证,因此在增广目标函数中只考虑其它变量的不等式约束对目标函数的惩罚,即对越限节点进行处理。增广目标函数表达式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_G} f(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{N_{st}} W(t) \max(0, x_j)$$

其中:  $x_j$  为对约束条件的违背,  $N_{st}$  为约束条件的数目,  $N_G$  为发电机数目。

### 2.3 抗体浓度的计算

现代免疫学理论认为:生物的免疫系统对于外来侵犯的抗原可由 B 细胞分泌相应的抗体来抵御。抗体和抗原结合后,会通过一系列的反应来破坏抗原。这种反应是基于抗体浓度进行的。根据上述机理可将抗原、B 细胞和抗体分别对应于待求解的问

题、问题的一个解  $x_i$ 、解的适应度函数  $f(x_i)$ 。  $N$  个抗体构成了一个非空免疫系统集合  $X$ 。若规定抗体  $f(x_i)$  在集合  $X$  上的矢量距为:

$$\rho(x_i) = \sum_{j=1}^N |f(x_i) - f(x_j)|$$

则抗体的浓度可用如下等式表示:

$$D(x_i) = \frac{1}{\rho(x_i)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^N |f(x_i) - f(x_j)|}$$

## 2.4 分化为记忆细胞和抑制细胞

当某种抗体的浓度超过某一给定阈值时,表明这种抗体在抗体群中占了绝对优势,即达到一个相对的最优点,产生记忆细胞  $m$ ,以记录代表此局部最优解的抗体。由于记忆细胞是有限的,当记忆细胞的数量达到一个上限值  $M$ ,计算已经保存和分化的抗体的结合力,具有较高的结合力的记忆细胞被新分化的细胞代替。记忆细胞同时作为抑制细胞,那些与抑制细胞具有较高结合力的抗体通过后面所述的生存率计算受到抑制。采用记忆细胞作为抑制细胞,目的是为了保证新的抗体不再继续陷入原有的局部最优点<sup>[8]</sup>。

## 2.5 抗体生存选择

由以上讨论,可推导出基于抗体浓度的概率选择等式:

$$P_S(x_i) = \frac{\rho(x_i)}{\sum_{i=1}^N \rho(x_i)} = \frac{\sum_{j=1}^N |f(x_i) - f(x_j)|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |f(x_i) - f(x_j)|}$$

由上式知,集合  $X$  中与抗体基因相似的抗体越多,抗体被选中的概率就越小。反之,与抗体基因相似的抗体越少,抗体被选中的概率就越大。这使含有有效进化基因的低适应度个体也可获得繁殖的机会。因此,基于矢量距的免疫算法在理论上保证了了解的多样性。

## 2.6 交叉和变异

通过生存选择存活的抗体,按照确定的交叉率和变异率进行交叉和变异。虽然在实际的免疫系统中,通常只有抗体的变异存在,在人工免疫算法中,还是借鉴了遗传算法中同时存在交叉和变异的思想。交叉算子可以采用算术杂交法或离散交叉法,本文算法采用离散交叉算法。变异算子采用了最简单的均匀变异。

## 3 仿真实验

为了验证本文算法的优越性,以 IEEE 30 节点系统为例,将本文提出的改进免疫算法计算结果与两种类型的算法进行比较。一种是作为随机性搜索方法代表的遗传算法,一种是作为确定性方法代表的原对偶内点法。

人工免疫算法—抗体数量  $N=100$ ; 最大进化次数  $G=200$ ; 活化细胞数目  $a=10$ , 亲和力最大的活化细胞克隆数量  $c_1=15$ , 亲和力最小的活化细胞克隆数量  $c_a=3$ , 总的克隆数量为  $c=90$ , 每次迭代淘汰并新补充细胞  $n=10$ 。

遗传算法具体实现参阅文献[9]。

原对偶内点法采取基于非线性规划的原对偶内点法,其具体实现可以参阅文献[10]所提出的方法。

表 1 给出了三种算法计算 IEEE 30 节点系统计算结果对比,我们将得到目标函数小于 4.5 认为算法收敛到最优解,可以看出,对于进行的 30 次计算,人工免疫算法在 200 代之后,都能够成功地收敛到最优解,而相同的代数下,采用精英选择的遗传算法只有不到四分之一的情况下成功,大部分情况不能收敛到最优解。原对偶内点法由于是一种基于二阶梯度的下降算法,其收敛速度很快,但是不能有效地摆脱局部极小点的影响。

表 1 IEEE 30 节点系统的目标函数计算结果

	function			
	最优结果	最差结果	目标函数小于 4.5 次数	总实验次数
本文算法	4.4465	4.4869	30	30
遗传算法	4.4501	14.0501	7	30
原对偶点算法	4.5058	4.5058		

从以上计算结果对比可以看出,本文提出的改进免疫算法具有较快的收敛速度和很强的全局搜索能力,能够有效地摆脱局部极小点的影响。

## 4 结论

免疫算法具有多样性、耐受性、免疫记忆、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等优点,本文将免疫优化算法引入到解决电力系统最优潮流问题中,具有以下几个特点:① 该算法模拟了免疫系统中抗体亲和力成熟的过程,相对于遗传算法加快了收敛速度;② 采用基于矢量距的设计体系,突破了传统免疫算法易于陷入局部最优的困境,能够有效地搜索到全局最优点;③ 收敛性较好,

不容易出现维数灾难的问题。

### 参考文献

- [1] Dommel H W, Tinney W F. Optimal Power Flow Solutions[J]. IEEE Trans on PAS, 1968, 87(10):1866-1876.
- [2] Sun P I, A shlev B, Brewer B, et al. Optimal Power Flow by Newton Approaching[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103( 10):2864- 2880.
- [3] Alsac O, Bright J, Prais M, et al. Further Development in LP based Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on PWRs, 1990, 5(3):697-711.
- [4] 程浩忠. 电力系统有功优化潮流算法研究——等效二次规划法[J]. 电力系统自动化, 1991, 15(4):52-57.
- CHENG Hao-zhong. Optimal Real Power Flow for Power System via Equivalent Quadratic Programming Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(4):52- 57.
- [5] 郝玉国, 刘广一, 于尔铿. 一种基于 Karmarkar 内点法的最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16( 6): 409-412.
- HAO Yu-guo, LIU Guang-yi, YU Er-keng. A New OPF Algorithm Based on Karmarkar's Interior Point Method[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16( 6):409-412.
- [6] 石立宝, 徐国禹. 基于进化规划的最优潮流计算[J]. 电网技术, 1998, 22( 2): 23-25.
- SHI Li-bao, XU Guo-yu. Evolutionary Programming Solution of Optimal Power Flow[J]. Power System Technology, 1998, 22( 2): 23-25.
- [7] 孙勇智. 人工免疫系统模型算法及其应用研究(博士学位论文).[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- SUN Yong-zhi. The Research on Model, Algorithm and Application of Artificial Immune System, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [8] 李涛. 计算机免疫学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- LI Tao. Computer Immunology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [9] 孙勇智. 基于人工免疫算法的电力系统最优潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12):30-33.
- SUN Yong-zhi. Solution of Optimal Power Flow Problem Based on Artificial Immune Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12):30-33.
- [10] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):14-17.
- GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. Nonlinear Programming Model & Algorithm for Point of Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4):14-17.

收稿日期: 2007-03-03; 修回日期: 2007-06-19

作者简介:

肖力(1970-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能计算. E-mail: XL662@126.com

(上接第 15 页 continued from page 15)

- [2] <http://www.mathworks.com/index.html>
- [3] <http://www.visual-graph.com/support/ie.htm>
- [4] 向遥, 李宏, 谢政. 运用 Java 编程扩展 Matlab 虚拟现实的交互功能研究与实现[J]. 计算技术与自动化, 2006 年, 25(1):83-85.
- XIANG Yao, LI Hong, XIE Zheng. Java Expand Interactivity of Matlab Virtual Reality Toolbox[J]. Computing Technology and Automation, 2006, 25(1): 83-85.
- [5] 胡锡伟, 殷伟凤. Matlab 与 Java 的联合应用研究[J]. 微机计算机信息, 2006, (2):265-267.
- HU Xi-wei, YIN Wei-feng. A Study of Integrated

Application of Matlab and Java[J]. Control & Automation, 2006(2): 265-267.

- [6] <http://www.ibm.com/developerworks/cn/webservices/index.Html>.

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2007-06-18

作者简介:

王玉忠(1966-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统自动化、信息化科研与教学工作; E-mail: njwyz@vip.sina.com

毕睿华(1977-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统自动化、信息化科研与教学工作。

## 我国研制出 800 kV 超高压断路器 技术达国际领先水平

我国自主研发的国内第一台 800 kV 超高压双断口罐式断路器, 8 月 18 日在中国西电集团西安西开高压电气股份有限公司出厂。这一产品技术参数达到国际领先水平, 它的研发成功打破了国际上少数几家企业对 800 kV 开关设备制造的垄断局面, 提高了我国开关设备的制造水平。

据介绍, 800 kV 高压开关设备, 在国内还没有企业可以制造, 国际上仍为三断口或四断口断路器, 技术相对落后, 这种状况已经制约了我国电力事业的发展。作为我国开关设备骨干制造企业, 西安西开高压电气股份有限公司从 2003 年 9 月开始自主研发, 经过研发人员几年的刻苦攻关, 先后完成了样机试制、试装配等一系列试验项目。2006 年 7 月, 产品通过国家发改委组织的验收。