

抗体克隆算法在配电网重构中的应用

何友林¹, 张洪涛², 郭创新¹, 王林青³, 朱承治¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2 许继集团公司, 河南 许昌 461000;

3. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 在人工免疫系统的克隆选择原理基础上, 提出了一种抗体克隆算法。该算法先克隆亲和度高的抗体, 然后利用小范围变异和大范围变异操作, 从而寻找全局最优解。小范围变异能在较优解的基础上找到更优的解, 增加找到全局最优解的机会。大范围变异能够防止抗体种群过早饱和, 确保抗体种群的多样性。该算法应用于配电网季节性产生的过负荷以及故障后恢复供电产生的过负荷, 通过优化开关操作使得配电网达到负荷均衡。算例表明本算法具有很高的搜索效率和寻优性能, 可有效地应用于以负荷均衡为目标的配电网重构。

关键词: 克隆选择; 抗体克隆算法; 人工免疫系统; 配电网重构; 负荷均衡

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0022-05

0 引言

配电自动化系统在馈线发生故障时, 利用 FTU 进行故障定位、隔离, 以及恢复供电。进行恢复供电时一般只考虑合上出口断路器和联络开关, 这样有可能使一端的馈线过负荷或者给此馈线供电的电站的主变压器过负荷。随着国民经济发展, 用电负荷越来越大, 日负荷变化以及季节负荷变化都很可能带来一些馈线以及厂变负荷过重, 而有些馈线低负荷现象。如果设备长期过负荷, 将会使设备老化加快, 带来系统安全隐患。

配电网闭环设计、开环运行的特点, 网络中存在着大量的开关, 运行人员通过操作开关来变换网络结构达到负荷均衡。以负荷均衡为目标的配电网重构, 在理论上是个非线性组合优化问题, 随着网络开关数量的增加会发生组合爆炸。文献 [1~4] 通过馈线重构改变配电网拓扑实现负荷均衡优化, 取得了一些研究成果。文献 [5] 采用启发式规则和模糊逻辑相结合, 来实现配电网故障恢复及负荷平衡的网络重构。采用变结构耗散网络 [6] 能够实现负荷均衡优化, 但当网络连通系结构不够灵活或其最低负荷比率设置不合理时, 有可能出现无法达到负荷均衡要求情况。遗传算法 [7] 在网络重构方面得到了应用, 但遗传操作过程中会产生大量不可行解, 搜索效率低。近年来, 免疫算法得到了专家学者的关注, 该算法由于引入了抗原识别、记忆、抗体的抑制和促进等机理, 因此和遗传算法相比具有更高的寻优效率, 已应用于电力系统领域 [8~10], 取得了良好效果。

本文在人工免疫系统的克隆选择原理基础上, 提出一种抗体克隆算法, 此算法只采用了克隆算子和变异算子, 而没有采用免疫算法 [2,3] 常采用的交叉算子和变异算子。通过克隆亲和度高的抗体放入记忆细胞, 在克隆抗体放入记忆细胞前, 由于亲和度高的抗体接近最优解, 因此在克隆的同时, 对克隆抗体的基因进行小范围变异, 防止了抗体浓度过早饱和同时增加了找到最优解的概率。通过计算克隆抗体和在记忆细胞里的抗体相似度, 对相似度几乎相等的克隆抗体进行大范围变异, 可以防止抗体浓度饱和, 保证抗体种群的多样性。在抗体克隆和变异的进化基础上形成了下一代的抗体。

1 网络重构的数学模型

本算法的目标是使配电网在重构后达到负荷均衡, 同时满足必要的约束条件。变压器和馈线的负荷水平通过负荷平衡率来表示。变压器和馈线的负荷平衡率的数学模型 [2,3] 可表示如下:

$$B(T) = \sum_{T_i} FN_{T_i} \times \left(\frac{I_{T_i}}{I_{T_i \text{ avg}}} \right)^2 \quad (1)$$

$$B(F) = \sum_{F_j} \left(\frac{I_{F_j}}{I_{F_j \text{ avg}}} \right)^2 \quad (2)$$

其中: FN_{T_i} 指主变压器 T_i 所供的馈线数; I_{T_i} 指主变压器 T_i 的总负荷电流; I_{F_j} 指馈线 F_j 的负荷电流;

$$I_{T_i \text{ avg}} = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} I_{T_i}; \quad I_{F_j \text{ avg}} = \frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} I_{F_j}, \quad n_t \text{ 指总的主变压器数, } n_f \text{ 指总的馈线数。}$$

本算法采用的优化的目标函数为方程(1)和(2)的联合,表示如下:

$$OPT = W_T \times B(T) + W_F \times B(F) \quad (3)$$

其中: W_T, W_F 分别指主变压器和馈线的负荷平衡权值。考虑到主变压器和馈线的过负荷严重程度的不同,所以在目标函数中引入了负荷平衡权值。

在开关操作之后母线的电压必须在允许的范围波动,同时主变压器和馈线所流过的负荷电流也必须在额定范围内:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, |I| \leq I_{\max} \quad (4)$$

其中: V_{\min} 指母线电压的下限, V_{\max} 指母线电压上限, I_{\max} 指主变压器和馈线的负荷容量。

2 抗体克隆算法

2.1 抗体的编码

淋巴细胞识别侵入的抗原同时产生抗体来消灭抗原,抗原和抗体分别代表问题和可行解。抗体的遗传代码结构类似于遗传算法的染色体结构。抗体群由 N 个抗体组成,每个抗体由 M 个基因组成, M 的大小为联络开关的数量。每个基因 $Sws(j)$ 里有两个开关 (x, y) , x 代表联络开关, y 代表常闭开关,它们分布在两个厂站之间的馈线上。在过负荷时,联络开关闭合,常闭开关跳开,达到转移负荷的目的。抗体结构如图 1 所示:

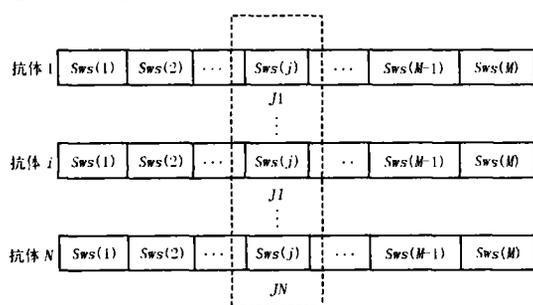


图 1 基因信息结构

Fig 1 Data structure of genes

2.2 亲和度和相似度

亲和度指抗原与抗体之间的匹配程度。数学表达式^[2]如下所示:

$$(Ag)_i = \frac{1}{1 + OPT_i} \quad (5)$$

其中: OPT_i 由方程(3)计算得到。当抗体与抗原越匹配时, $(Ag)_i$ 越靠近 1。

相似度指抗体与其它抗体之间的相似程度。为了防止优化结果过早饱和和落入局部最优,通过计算抗体之间的相似度,来保证抗体种群的多样性。

在此采用信息熵理论,抗体中第 j 位基因的信息熵数学表达式如下所示:

$$H_j(N) = - \sum_{i=1}^N P_{ij} \log P_{ij} \quad (6)$$

式中: P_{ij} 表示第 i 个抗体的等位基因源于第 j 个基因的概率,如果在位置 j 上的所有抗体的等位基因相同则 $H_j(N)$ 等于零。基因多样性的平均信息熵 $H(N)$ 定义如下:

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (7)$$

式中: $H_j(N)$ 由(6)计算得到, M 为抗体基因的大小。抗体 i 与抗体 j 的相似度^[2]定义如下:

$$(Ab)_{ij} = \frac{1}{1 + H(2)} \quad (8)$$

式中: $H(2)$ 仅为抗体 i 和抗体 j 的信息熵。 $H(2) = 0$ 表示抗体 i 和抗体 j 的基因完全相同。

2.3 初始抗体群的产生

本算法要求初始抗体群在可行解中形成。抗体的基因大小为馈线的可能发生操作的联络开关数目。抗体中的每一个基因都是由两个开关组成,一个为联络开关,另外一个为常闭开关。和联络开关对应的常闭开关的选择必须在联络开关所连接两个厂站之间的馈线上,意味着在可行解范围内选择基因。随机产生一个候选抗体后,根据组合的开关操作,计算相应的馈线负荷和变压器负荷,如果馈线或者主变压器上出现过负荷,则删除这个候选抗体;如果满足目标函数约束,则把此候选抗体添加入初始抗体群。根据初始抗体群的大小,通过上面方式的循环选择,直到满足初始抗体群容量为止。

2.4 抗体进化策略

2.4.1 克隆

本算法对与抗原的亲密度高的抗体进行克隆,让亲密度高的抗体得到了保留和发展,同时让亲密度低的抗体减少了进入下一代的机会,这种抗体补充机制提高了免疫系统的抗原识别概率。若抗体群由 N 个个体组成,根据各个抗体亲和度的高低,对它们进行从高到低排序。选择前 K ($K < N$) 个亲和度高的抗体形成克隆抗体群, K 的大小由选择率和抗体群容量计算确定。克隆抗体群中的每一个抗体的克隆个数通过轮盘赌的方式确定,克隆的总数为 $N - K$ 个。所以,由父代亲密度高的 K 个抗体群和克隆抗体群作为进化子代抗体群的基础。

2.4.2 变异

在较优抗体克隆的基础上,为了确保找到全局

最优解和抗体种群的多样性,提高优化处理效率,本算法对抗体进行了小范围变异和大范围变异操作。小范围变异能在较优解的基础上找到更优的解,增加找到全局最优解的机会。大范围变异能够防止抗体种群过早饱和,确保抗体种群的多样性。

小范围变异指抗体的部分基因在可行解的小范围内变化。本算法应用是指抗体里一个基因,即一对联络开关和闭合开关,把闭合开关随机变换为馈线上此开关的上一级开关或者下一级开关;如果闭合开关为馈线出口开关,则它只有下一级开关,因此闭合开关只能变换为此开关的下一级开关。例如,在图3中一个基因为联络开关10和闭合开关12组成,闭合开关12的上一级开关为11,下一级开关为13,小范围变异指闭合开关12只能随机变换为闭合开关11或者13。闭合开关变化之后,和这些开关相联系的馈线以及厂主变的负荷也会发生较小范围的变化。这样在较优解的基础上增加了找到最优解的概率。

大范围变异指抗体的部分基因在可行解的大范围内变化。本算法应用是指抗体的所有或者部分基因,即针对每对联络开关和闭合开关,把闭合开关随机变换为包含这一对开关并且和两个厂站相连的馈线上分布的任何一个开关。例如,在图3中一个基因为联络开关35和闭合开关71组成,馈线HJ51和HJ75包含这一对开关且连接两厂站的母线,大范围变异指闭合开关71可以变换为馈线HJ51和HJ75上的任何一个开关。闭合开关变化之后,和这些开关相联系的馈线以及厂主变的负荷很可能发生大范围的变化。这样确保了抗体的多样性,防止了算法落入局部最佳解。

2.5 算法的终止条件

本算法采用达到最大进化代数作为计算终止条件。在算法仿真中,估计配电网最复杂的初始状态,然后在此状态下进行多次迭代验证计算,调整进化代数,直到每次计算所得最佳结果一致,将这个结果作为最佳解,接着再以得到这个解为终止条件进行*f*次计算,并记录每次仿真的进化代数 $n_i, i=1, 2, \dots, f$,最后得到最大进化代数*F*,其满足的条件是对于95%的仿真, $F < n_i, F$ 取满足该条件的最小值。

3 算例分析

为了验证本文方法的可行性,用本文提出的方法对配电网^[2]进行以负荷均衡为目标的网络重构计算。该系统如图2所示,它有6个主变压器、18

条馈线和79个开关。每个主变压器的额定容量为30 MVA,馈线容量为600 A。配电自动化系统通过FTU监控馈线上开关,采集馈线上的负荷数据上传到监控中心的SCADA系统。利用监控中心采集到的负荷数据,通过抗体克隆算法进行网络重构计算,求解最优开关操作方案。

本文在优化搜索过程中,对主变压器和馈线使用不同的权值来获得最优开关操作。在抗体克隆算法中,抗体池和记忆细胞大小都为100,克隆选择率为0.3,小范围变异为在抗体的小邻域内一个基因变异,大范围变异为抗体在可行解内多个基因变异。本算法使用Java语言编写,在不同的权值下进行优化开关操作。算法多次仿真结果表明优化处理所需时间为8秒多。在执行开关操作前,主变压器MT6已经过载,承受的负荷值807A,配电主变和馈线的负荷都相当不均衡^[2]。利用抗体克隆算法优化后,MT6的负荷从807 A降到600 A以下。当主变压器的权值为1时,算法优化计算后得到6台主变压器的负荷分别为516 A、498 A、482 A、486 A、510 A和501 A,可以看出变压器之间的负荷分配相当均衡;当馈线的权值为1时,算法优化计算后得到6台主变压器的负荷分别为356 A、418 A、595 A、434 A、645 A和545 A,可以看出变压器之间的负荷分配比较均衡。当 W_T 和 W_F 都为0.5时,文献[2]算法优化结果为需要操作8对开关,而本文算法优化结果只需要操作6对开关((61, 60), (50, 79), (21, 38), (35, 72), (22, 41), (34, 67));同时,文献[2]算法优化结果后主变压器最大负荷为607 A,而本文算法优化结果后主变压器最大负荷为603 A。从以上两点可以看出本文算法在优化效果上优于文献[2]算法。在不同的权值下通过优化开关操作解决了配电主变压器和馈线的负荷不均衡问题,验证了抗体克隆算法在网络重构中的有效性。

图3显示了抗体克隆算法在抗体种群进化过程中,每一代最优抗体和抗原的亲亲和度的变化曲线。通过亲和度变化曲线可以观察到每一代最佳抗体亲和度的不断提高,最后达到稳定,获得了全局最优解。

4 算例比较

图4为本文算法和遗传算法的比较。遗传算法采用交叉率为0.8,变异率为0.1,群体规模为100,以及采用赌轮选择机制,编码方式和抗体克隆算法一样。从优化处理过程比较曲线可以看出,抗体克

隆算法以较少的迭代次数就能够获得稳定的最优解,即找到全局最优解,而遗传算法进化过程中每一

代最优解波动较大,需要进化更多的次数才可能找到最优解。

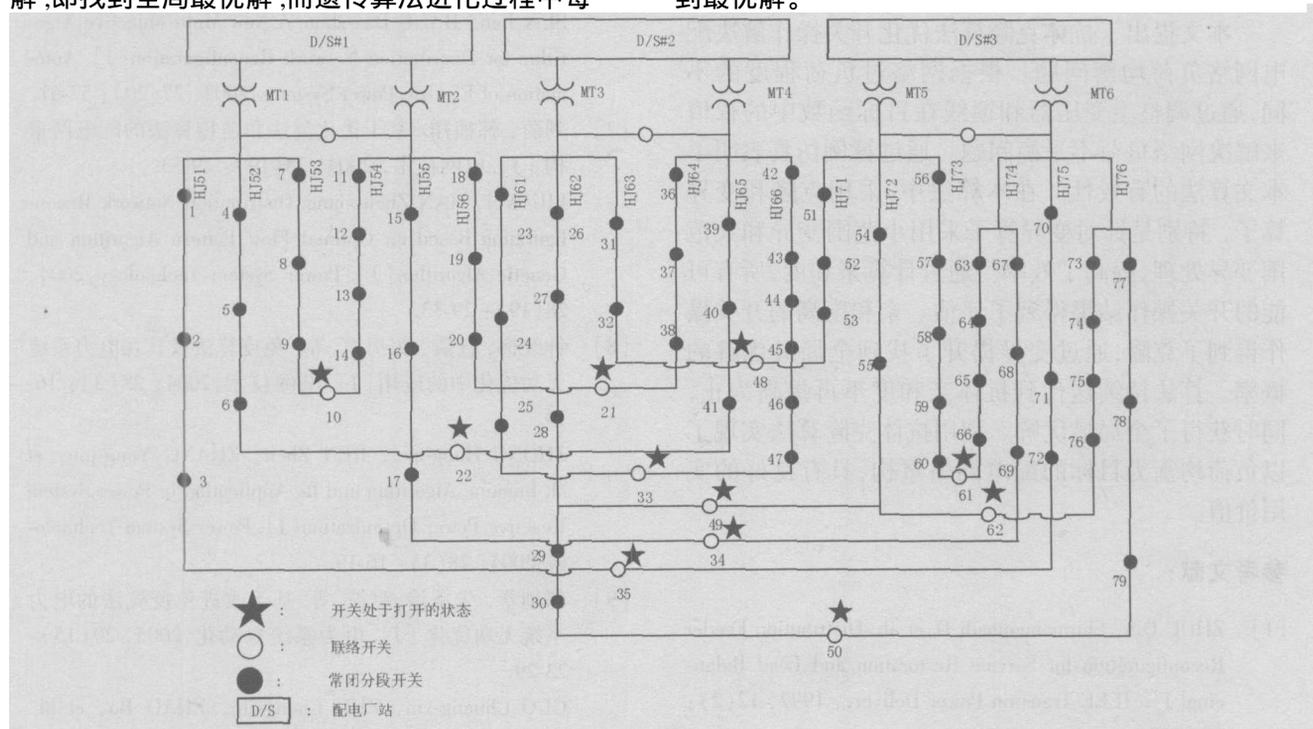


图 2 系统单线图

Fig 2 One-line diagram of the system

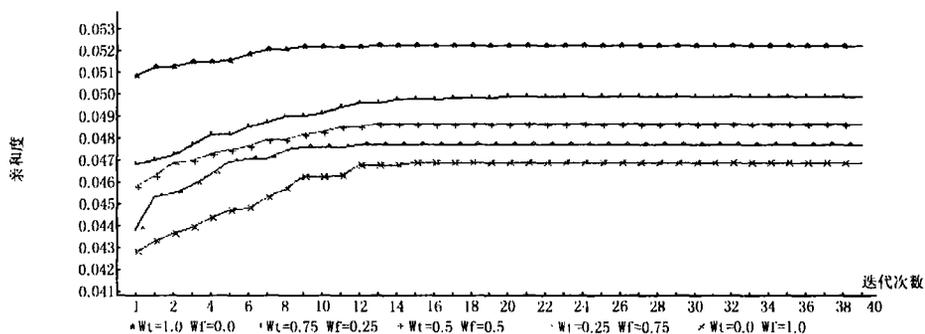


图 3 优化处理期间最佳解决方案的相对亲和力曲线

Fig 3 Relative affinity of the best solution during optimization procedure

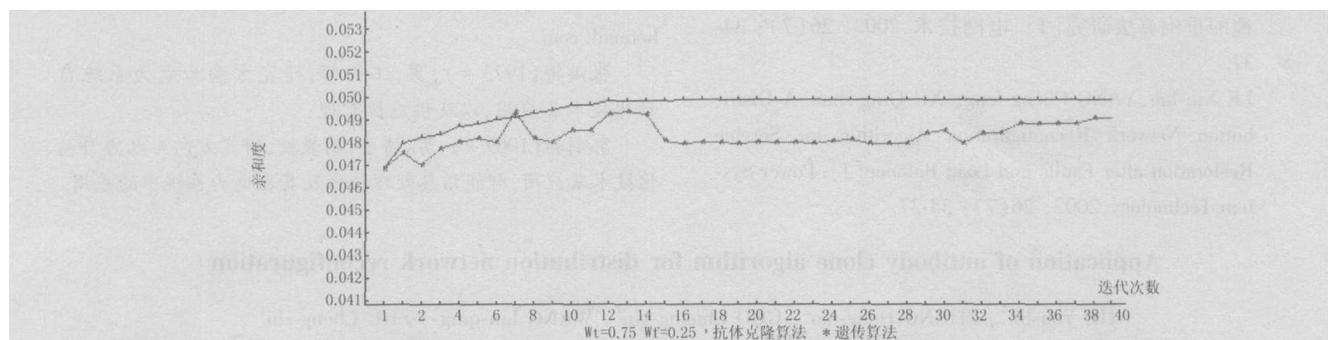


图 4 抗体克隆算法和遗传算法最佳解决方案的相对亲和力曲线

Fig 4 Relative affinity of the best solution between antibody clone algorithm and genetic algorithm

5 结论

本文提出了抗体克隆算法优化开关操作解决配电网负荷均衡问题。根据网络过负荷程度的不同,通过调整主变压器和馈线在目标函数中的权值来解决网络负荷不平衡问题。通过算例仿真表明了本文算法的有效性。在本算法中,采用克隆和变异算子,特别是针对变异算子采用小范围变异和大范围变异处理,提高了效率。通过计算亲和度,所有可能的开关操作结果得到了评估。亲和度高的开关操作得到了克隆,通过变异提升了找到全局最优解的概率。算法持续迭代到抗体亲和度不再提高为止,同时获得了全局最优解。利用抗体克隆算法实现了以负荷均衡为目标的配电网重构,具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] ZHOU Qin, Shimohammadi D, et al Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 724-729.
- [2] LN Chia-hung, CHEN Chao-shun, WU Chia-jean Feeder Reconfiguration for Distribution System Contingencies with Immune Algorithm [A]. IEEE Porto Power Tech Conference - September Porto (Portugal): 2001.
- [3] LN Chia-hung, CHEN Chao-shun, WU Chia-jean Immune-Based Optimization Method for Loading Balance of Main Transformers and Distribution Feeders [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001.
- [4] 林景栋, 曹长修, 张帮礼. 配电网负荷均衡的网络分割算法 [J]. 继电器, 2003, 31(7): 6-11.
LN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li Graph Partitioning Method of Loads Equalization for Distribution Networks [J]. Relay, 2003, 31(7): 6-11.
- [5] 乐秀, 杨成峰, 徐青山. 配电网故障恢复及负荷平衡的重构算法研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(7): 34-37.
LE Xiu-fan, YANG Cheng-feng, XU Qing-shan A Distribution Network Reconfiguration Algorithm for Service Restoration after Faults and Load Balance [J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 34-37.
- [6] 孙健, 江道灼. 一种多目标配电网重构算法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 57-61.
SUN Jian, JIANG Dao-zhuo A New Multi-objective Algorithm for Distribution Network Reconfiguration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57-61.
- [7] 刘蔚, 韩祯祥. 基于优化流法和遗传算法的配电网重构 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.
LIU Wei, HAN Zhen-xiang Distribution Network Reconfiguration Based on Optimal Flow Pattern Algorithm and Genetic Algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33.
- [8] 钟红梅, 任震, 张勇军, 等. 免疫算法及其在电力系统无功优化中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(3): 16-19.
ZHONG Hong-mei, REN Zhen, ZHANG Yong-jun, et al Immune Algorithm and Its Application in Power System Reactive Power Optimization [J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 16-19.
- [9] 郭创新, 朱承治, 赵波, 等. 基于改进免疫算法的电力系统无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 23-29.
GUO Chuang-xin, ZHU Cheng-zhi, ZHAO Bo, et al Power System Reactive Power Optimization Based on an Improved Immune Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 23-29.
- [10] 牛雪媛, 陈根永, 谢志棠, 等. 考虑停电损失的配电网架规划的免疫算法 [J]. 继电器, 2003, 32(7): 10-13.
NIU Xue-yuan, CHEN Gen-yong, XIE Zhi-tang, et al Artificial Immune Algorithm for Distribution Network Structure Planning with Power Outage Cost [J]. Relay, 2003, 32(7): 10-13.

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2006-04-06

作者简介:

何友林 (1978 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能信息处理技术及其在电力系统中的应用; E-mail: he_youlin@hotmail.com

张洪涛 (1973 -), 男, 工程师, 研究方向为电力系统自动化技术及应用, 以及供应链管理;

郭创新 (1969 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力自动化技术及应用, 智能信息处理技术及其在电力系统中的应用。

Application of antibody clone algorithm for distribution network reconfiguration

HE You-lin¹, ZHANG Hong-tao², GUO Chuang-xin¹, WANG Lin-qing³, ZHU Cheng-zhi¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;

(下转第 43 页 continued on page 43)

- [6] 邓拥军,王伟,钱成春,等. EMD方法及 Hilbert变换中边界问题的处理 [J]. 科学通报, 2001, 46 (3): 257-263
DENG Yong-jun, WANG Wei, QIAN Cheng-chun, et al Comments and Modifications on EMD Method [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (3): 257-263
- [7] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社, 1994.
ZHANG Xian-da Modern Signal Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [8] 史习智,等. 信号处理与软计算 [M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
SHI Xi-zhi, et al Signal Processing and Soft Computation [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [9] Auger A, Flandrin P. Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1995, 43 (5).
- [10] 姜鸣,陈进,汪慰军. 几种 Cohen类时频分布的比较及应用 [J]. 机械工程学报, 2003, 29 (3): 129-134.
JIANG Ming, CHEN Jin, WANG Wei-jun Comparison and Application of Some Time-frequency Distribution Belonging to Cohen Class [J]. Chinese Journal of Mechan-
- cal Engineering, 2003, 29 (3): 129-134
- [11] Poisson O, Rioual P. New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (2): 561-566
- [12] Shin Y J, Parsons A C, Powers E J, et al Time-frequency Analysis of Power System Disturbance Signals for Power Quality [A]. Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE 1999. 402-407.
- [13] 刘安定,肖先勇,邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法 [J]. 继电器, 2005, 33 (8): 27-30.
LIU An-ding, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun A New Method for Detecting Short Duration Disturbance of Power Quality [J]. Relay, 2005, 33 (8): 27-30.

收稿日期: 2005-12-20; 修回日期: 2006-01-24

作者简介:

乐叶青 (1980 -),男,硕士研究生,主要从事电能质量、高压直流输电系统谐波抑制方面的研究工作; E-mail: leyeqing@126.com

徐政 (1962 -),男,博士,教授,博士生导师,主要从事直流输电、柔性交流输电和电力系统谐波分析等方面的研究工作。

Application of smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution in detecting harmonics and short duration voltage variations

LE Ye-qing, XU Zheng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper analyzes and compares the current techniques applied to detect SDPQD (Short Duration Power Quality Disturbances), and proposes a new method to detect and analyze SDPQD using Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD). Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution is an excellent algorithm to analyze the non-steady signal by joint time-frequency analyzing. The simulated results show the time-frequency analysis method is remarkably efficient in detecting the time and frequency information of accident short-time voltage variations, harmonics and interharmonics in power system.

Key words: power quality; short duration voltage variations; harmonics; interharmonics; cross time-frequency; Wigner-Ville distribution (WVD); Smoothed Pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD)

(上接第 26页 continued from page 26)

3. School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper proposes an antibody clone algorithm which based on the clonal selection theory of artificial immune system. It is firstly to clone the higher affinity antibodies, then to take advantage of the mutations between small and large scope to find out the global best solution. Mutation in small scope can find the better solution based on the optimal solution and has more chance to get the global best solution. Mutation in large scope can prevent the antibodies premature and make sure of the diversity of antibodies. The algorithm can be used in overloading caused by season change or overloading caused by post-fault power restoration in distribution network, to get the loading balance through the optimal switching operation. The test shows that the antibody clone algorithm has the prominent efficiency and significant global optima searching performance, and can be effectively used to reconfigure power distribution network for making loading balance.

Key words: clone selection; antibody clone algorithm; artificial immune system; distribution network reconfiguration; load balance