

免疫遗传算法在多机电力系统 PSS 参数优化中的运用

刘杨名¹, 严正¹, 胥国毅²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 电力系统稳定器参数的优化对于抑制多机电力系统低频振荡具有非常重要的意义。运用免疫遗传算法对多机系统 PSS 参数进行优化, 将免疫操作融入基本的遗传算法中, 运用免疫二次应答原理有效抑制了参数抗体在交叉、变异过程中的退化现象, 提高了寻优过程的收敛性和稳定性。算例表明, 采用免疫遗传算法对 PSS 参数优化其收敛性、计算时间和稳定性方面都优于传统遗传算法, 将经过参数优化后的 PSS 加装到系统中, 不仅可以克服低频振荡现象, 而且使系统的稳定性大幅度增强。

关键词: 多机电力系统; 电力系统稳定器; 免疫遗传算法; 二次应答; 遗传算法

Parameter optimization of power system stabilizers using immune genetic algorithm in multi-machine system

LIU Yang-ming¹, YAN Zheng¹, XU Guo-yi²

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Parameter optimization of power system stabilizers is very important to restrain the low-frequency oscillation of multi-machine systems. In this paper, a method called immune genetic algorithm is used to optimize PSS parameters. Immune operators are added in simple genetic algorithm and immune secondary response restrains degeneration phenomenon during crossing and mutation of parameter antibodies, which improves the optimization convergence and stability. The numerical example shows that the algorithm is more effective than the simple genetic algorithm in the characteristic of convergence, solution speed and stability. And the power system with optimized PSS parameters not only can overcome low frequency oscillating phenomenon, and the stability of the system is strengthened by a wide margin.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.6047048 and No.90612018).

Key words: multi-machine power system; power system stabilizer; immune genetic algorithm; secondary response; genetic algorithm

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)07-0019-05

0 引言

电力系统稳定器 (Power System Stabilizer) 是抑制系统低频振荡最有效且经济的措施, 通常以 $\Delta P, \Delta \omega, \Delta f$ 等反馈信号作为输入^[1], 增大系统机电模式阻尼, 抑制系统的低频振荡, 提高系统的稳定性。PSS 的优化配置对于提高电力系统的稳定性具有重要的意义, 已经引起了国内外研究人员的广泛关注, 近些年来研究热点主要集中在采用各种优化算法对 PSS 参数进行优化。文献[2]采用梯度类方法研究了多运行方式下的 PSS 优化配置, 但计算结果容易陷入局部极值。为得到全局最优解, 文献[3]采用了遗传算法 GA (Genetic Algorithm), 但是其收敛性差, 且需要同时优化两个目标函数, 可操作性较差。

本文提出了一种基于免疫遗传算法 IGA (Immunogenetic algorithm)^[4,5] 的 PSS 参数优化方法。该方法的优化目标为度量系统动态性能的指标, 将 PSS 参数优化协调问题转化为带有不等式约束的优化问题。用免疫遗传算法对该问题求解, 有效抑制基本遗传算法的“早熟”, 不致使问题的解过早收敛于局部最优解, 提高了寻优过程的收敛性和稳定性。算例仿真表明, 采用该方法对多机系统 PSS 参数进行优化, 较传统的遗传算法可以达到更好的效果。

1 PSS 参数优化问题数学描述

1.1 电力系统模型

电力系统模型的微分方程描述为:

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (1)$$

式中: X 为状态变量向量, U 为控制变量向量。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60474048, 90612018)

式(1)在稳定点线性化后得:

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (2)$$

其中: $A = \frac{\partial f}{\partial X}, B = \frac{\partial f}{\partial U}$

$\Delta X, \Delta U$ 表示状态变量和控制变量的偏差量。

1.2 PSS 模型

本文 PSS 采用超前-滞后校正模型^[6], 取发电机的转速偏差 $\Delta\omega_i$ 为输入信号。其传递函数为:

$$V_{out} = \frac{sK_i (1+sT_{1i})(1+sT_{3i})}{(1+sT_{wi})(1+sT_{2i})(1+sT_{4i})} \Delta\omega_i \quad (3)$$

其中: V_{out} 为发电机 PSS 的输出信号; K 为隔直环节时间常数与增益的乘积; T_w 为隔直环节时间常数; $\Delta\omega$ 为发电机角速度偏差量, 这里作为 PSS 的输入信号。

1.3 优化模型

电力系统状态矩阵的特征值 ($\lambda = \sigma_i + j\omega_i$) 决定了整个系统的稳定状况。对于振荡模式, ω_i 是其振荡的角频率, 其阻尼比^[1]为:

$$\xi = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (4)$$

理想的 PSS 参数应能适应各种运行工况, 但电力系统的运行工况时刻变化, 基于某种运行工况配置的 PSS 参数可能在其它工况下失效, 甚至起到反作用; 然而考虑所有运行工况对问题进行优化, 会使运算量过大, 造成维数灾, 不利于问题的解决。因此, 在对 PSS 参数进行优化时, 本文选择系统的三种典型运行工况进行研究。优化问题的目标函数定义为:

$$J = \min_{\xi_{i,j}} \left\{ \begin{array}{l} i \in \text{多种机电振荡} \\ \text{模态集合, } j=1, \dots, k \end{array} \right\}$$

根据阻尼比的意义^[7], 优化的目标要使 J 尽可能大, 为此优化问题如下:

$$\begin{aligned} \text{Max } J = \max \min_{\xi_{i,j}} \left\{ \begin{array}{l} i \in \text{多种机电振荡} \\ \text{模式集合, } j=1, \dots, k \end{array} \right\} \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} K_{i,\min} \leq K_i \leq K_{i,\max} \\ T_{1i,\min} \leq T_{1i} \leq T_{1i,\max} \\ T_{3i,\min} \leq T_{3i} \leq T_{3i,\max} \end{array} \right. \quad (5) \end{aligned}$$

其中: $\xi_{i,j}$ 为第 j 种运行方式下, 第 i 个机电振荡模式的阻尼比; k 为运行方式个数。 T_{wi}, T_{2i}, T_{4i} 为给定值。

2 免疫遗传算法

2.1 概述

2.1.1 遗传算法

遗传算法仿效生物的进化与遗传, 通过复制、交换、突变等操作, 逼近最优解。它不要求优化问题连续、可导即可微, 常用于解决传统数学优化算法不易求解的问题。但遗传算法存在一些局限性^[8]:

1) 交叉、变异和选择算子都是按一定概率随机进行, 因此在群体中某些个体进化的同时, 某些个体也不可避免地会产生退化。

2) 局部收敛能力差, 容易陷入局部最优解, 优化结果不能够得到满意的全局最优解。

2.1.2 免疫系统

免疫系统是一种由众分子和组织等子系统构成的复杂系统, 这些子系统之间存在着复杂的相互联系, 具有能识别“自己”和“非己”、清除和消灭异物的功能^[5]。T 细胞和 B 细胞是两种主要类型的免疫细胞。免疫系统具有以下特点:

1) 多样性。抗体具有多样性, 它能够有效地消灭不同的侵入细胞。

2) 自适应性。免疫系统是自适应系统, 学习能力很强, 能够随环境的改变而不断完善。

3) 速度快。免疫系统可以根据抗原的特性快速产生抗体。

4) 二次应答性。免疫系统对抗原初次响应后, 当再次遇到相同抗原时, 能够产生再次应答, 从而快速有效地消灭病原。

2.1.3 免疫遗传算法

为解决基本的遗传算法中子代退化和收敛性差的问题, 将免疫操作融入, 形成了一种新的遗传优化算法。该方法是一种确定性和随机性选择相结合的启发式随机搜索算法, 它被认为是对生物自适应免疫应答中体液免疫的简单模拟, 这种应答过程通过抗体学习抗原来完成。

1) 算法具有免疫记忆功能, 可确保快速收敛于全局最优解;

2) 在基本遗传算法选择、交叉和变异的基础上增加免疫操作, 即随机选择部分抗体接种疫苗, 从而抑制在交叉、变异过程中的退化, 增大适应度较低的抗体进化为适应度较高的抗体的可能性。

3) 通过促进或抑制抗体的产生, 体现了免疫系统的自我调节功能。

算法中优化问题的目标函数对应于侵入抗原, 免疫系统产生的抗体则代表了优化问题的解。

2.2 PSS 参数优化

2.2.1 适应度评价

适应度函数取式(5), 其中: $T_1=20, T_{2i}=0.02, T_{4i}=0.02$ ($i=2, 3$), 根据参与因子^[7]待定的参数为 2 号机和 3 号机的 K_i, T_{1i}, T_{3i} ($i=2, 3$)。优化过程中它们的范围依次为 $[0.1, 1000], [0.01, 1.0], [0.01, 1.0]$ 。抗

体群大小为 $M=100$, 计算代数 $G=100$, 抗体为 48 位二进制数。

2.2.2 多样性

算法利用信息熵的概念实现多样化。设一个免疫系统由具有 M 个基因的 N 个抗体组成, 由信息学理论, 第 i 个基因的平均信息量 $E_j(N)$ 可以计算为:

$$E_j(N) = \sum_{i=1}^N P_{ij} \lg\left(\frac{1}{P_{ij}}\right) \quad (6)$$

其中: P_{ij} 是第 i 个等位基因来自第 j 个基因的概率。

利用信息熵的概念一方面可以说明抗原和抗体之间的关系; 另一方面负责抗体之间的协同关联程度, 表达如下:

$$(A_b)_{ij} = \frac{1}{1+E(2)} \quad (7)$$

其中: $(A_b)_{ij}$ 是第 i 个抗体和第 j 个抗体之间的亲和力。 $E(2)$ 是抗体 i 和抗体 j 之间的平均信息量。 $E(2)$ 等于 0 表示第 i 个抗体和第 j 个抗体基因相同。

N 个抗体的亲和力可表示为:

$$A = \frac{1}{1+E(N)} \quad (8)$$

A 反映了群体多样性的程度。 A 变大时, 多样性就变小。所以群体多样性 D 与亲和力 A 的关系可写为

$$A + D = 1 \quad (9)$$

2.2.3 浓度计算

抗体浓度可用抗体间的亲和力表示。这样抗体 i 的浓度可表示为

$$D_{\text{density}} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N (A_b)_{ij}}{\sum_{j=1}^N A_j} \quad (10)$$

2.2.4 二次应答

由免疫系统概念和免疫应答过程可知, 新抗原侵入免疫系统时, 系统发出初次应答。但若应答时间太长, 且大部分抗体为低亲和力抗体, 而且若应用对象为一个时变系统(如电力系统), 当免疫系统经过初次应答产生出相应的抗体时, 侵入的抗原又发生了变化(即使侵入抗原没有发生变化, 初次应答产生的低亲和力抗体也不能很好地对抗外来的抗原)。根据二次应答的概念, 以前发生初次免疫应答所产生的高亲和力抗体存放在记忆细胞池中, 当新抗原侵入时, 把这些抗体从记忆细胞池中调出, 并注入免疫系统, 即发生了二次免疫应答^[4]。

2.3 计算步骤

- 1) 抗原识别。输入待求解实际问题目标函数。
- 2) 根据参数的范围, 产生初始抗体群 ($M=$

100)。用长度为 18 位、15 位和 15 位的二进制编码串分别表示 K_i, T_{ii}, T_{3i} ; 若记忆细胞池为空, 则随机产生初始群体; 否则, 计算记忆细胞中的群体多样性, 如果满足条件则从记忆细胞中提取, 不满足条件则随机产生初始群体。

3) 通过 T 细胞调节和 B 细胞的增殖分化, 产生抗体, 并计算亲和力进而调节抗体浓度。算法中体现在遗传算法的选择算子中加入浓度函数来调节抗体浓度。

4) 促进或抑制抗体的生成。使得与抗原亲和力高而浓度低的抗体得到促进; 否则, 抗体得到抑制。

5) 搜索最优个体和最差个体, 随机增加一些新抗体。这样可以保证算法的收敛性, 还可以在极端条件下跳出局部陷阱。

6) 更新抗体群。

7) 中止条件判断。若抗体群中最好个体的阻尼比满足要求或计算代数超过最大代数, 则计算终止。否则返回到步骤 2)。

2.4 算法流程

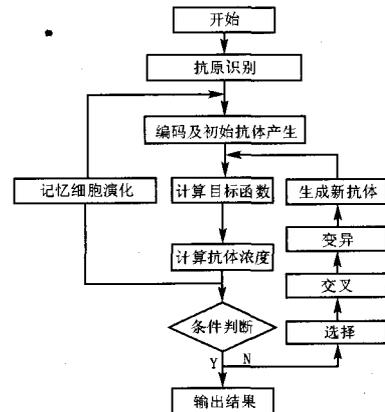


图 1 免疫遗传算法原理框图

Fig.1 Flow chart of the IGA approach

3 算例分析

根据参与因子法^[7]可知 PSS 选址应安装在 2、3 号机上。本文使用 Matlab 编制的免疫遗传算法的程序, 对图 1 两区域四机系统进行了 PSS 参数优化仿真。

3.1 两区域四机系统

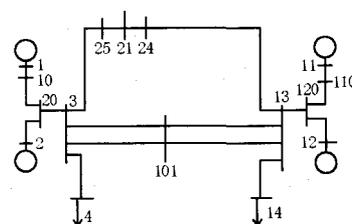


图 2 两区域系统图

Fig.2 Two-area power system

图 2 中 $G_1 \sim G_4$ 采用五阶模型^[1]; 1 号机和 2 号机采用自并励静止励磁模型^[9]; 3 号机和 4 号机采用可控硅励磁调节器模型^[1]; 三种运行方式参数和系统参数详见附录。

3.2 PSS 参数优化结果

系统有 4 台发电机, 故存在 3 个机电振荡模式^[1], 一般认为机电模式的阻尼比大于 0.05 时, 系统才可以接受这种运行状态^[9]。从表 1 可以看出, 未安装

PSS 时, 工况 1 的振荡最明显, 甚至出现了负阻尼。

使用 IGA 算法对 PSS 参数进行优化的结果如表 3 所示, 各种运行方式下系统机电模式阻尼均明显增加, 有效抑制了低频振荡, 系统的稳定性增强。与 GA 算法的优化效果比较可知, 其收敛性及计算速度均明显占优。

表 1 系统未装 PSS 时的机电振荡模式

Tab.1 Electromechanical modes of two-area system without PSSs

工况 1		工况 2		工况 3	
特征根	阻尼比	特征根	阻尼比	特征根	阻尼比
$0.11 \pm j3.55$	-0.031 0	$-0.29 \pm j0.61$	0.429 4	$-0.77 \pm j6.74$	0.113 5
$0.18 \pm j3.37$	-0.053 3	$-0.26 \pm j3.94$	0.065 8	$-0.28 \pm j3.61$	0.077 3
$-0.21 \pm j5.43$	0.038 6	$-1.09 \pm j6.51$	0.165 1	$-0.80 \pm j6.85$	0.116 0

表 2 PSS 参数优化数据

Tab.2 The optimal settings of PSSs in two-area system

方法	免疫算法 (IGA)			遗传算法 (GA)		
	K	T_1	T_3	K	T_1	T_3
2#机	507.137	0.027 8	0.632 5	661.409	0.735 8	0.207 2
3#机	809.257	0.100 3	0.067 4	207.372	0.545 9	0.050

表 3 系统安装优化的 PSSs 后的机电振荡模式

Tab.3 Electromechanical modes of two-area system with optimal PSSs

	工况 1		工况 2		工况 3	
	特征根	阻尼比	特征根	阻尼比	特征根	阻尼比
GA	$-0.16 \pm j3.011$	0.053 1	$-0.41 \pm j3.605$	0.113 0	$-0.57 \pm j4.49$	0.125 9
	$-0.67 \pm j6.85$	0.097 3	$-0.26 \pm j1.79$	0.143 7	$-1.24 \pm j6.34$	0.191 9
	$-0.875 \pm j7.177$	0.121 0	$-0.93 \pm j6.61$	0.139 3	$-0.30 \pm j1.46$	0.201 3
IGA	$-1.37 \pm j5.64$	0.236 0	$-1.03 \pm j4.38$	0.228 9	$-2.59 \pm j5.38$	0.433 8
	$-13.43 \pm j22.06$	0.520 0	$-2.38 \pm j5.11$	0.422 2	$-3.28 \pm j7.14$	0.417 4
	$-1.16 \pm j3.37$	0.325 5	$-8.60 \pm j9.95$	0.653 9	$-15.65 \pm j20.28$	0.610 9

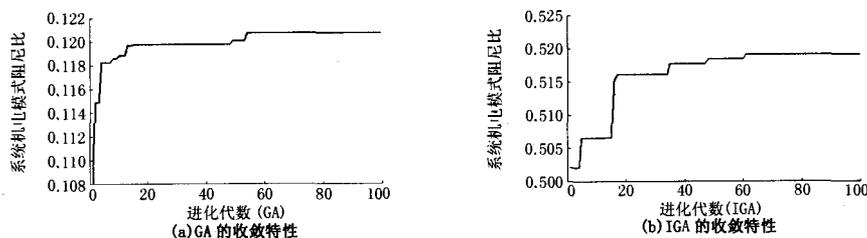


图 3 IGA 和 GA 收敛性能比较

Fig.3 Convergence ability comparison between IGA and GA

表 4 算法结果比较

Tab.4 Comparison of the identification results of the two algorithms

方法	群体	代数	Max ξ	时间/s
GA	100	100	0.121 0	5 979.4
IGA	100	100	0.520 0	3 834.7

(注: 表中 ξ 为机电模式阻尼比)

综合图 3 和表 4, 两种方法都可以使系统机电模式阻尼比在预定的代数内收敛, 但是 IGA 优于

GA。在进化的 100 代内, 由于 GA 存在早熟, 使系统机电模式阻尼比收敛到 0.121 0 左右不再进化, 这个结果低于 IGA 优化的 0.52。IGA 中加入免疫操作后, 算法的寻优的效率提高明显, 计算时间得到有效节约。

4 结论

本文用免疫遗传算法对多机系统 PSS 参数进行优化, 得到的结论如下:

1) IGA 属于全局优化算法,适合于求解类似多机系统 PSS 参数优化等变量较多的函数优化问题。

2) 在基本遗传算法基础上增加免疫操作,利用免疫应答中二次应答快速的特点,改善基本遗传算法收敛慢的弱点,可以极大地加快收敛速度,增强了算法寻找全局最优解的能力。

3) 免疫遗传算法抑制了抗体在交叉、变异时

出现的退化,提高了参数优化的稳定性。

4) 算例表明,IGA 的优化效果明显优于 GA, PSS 参数经优化后,系统的低频振荡现象得到了很好抑制,系统稳定性有了大幅度提高。

附录

两区域四机系统的原始数据

附表 1 发电机参数

	R	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q	X_1	T'_{d0}	T'_{q0}	T''_{d0}	T''_{q0}	H	MVA Rating
参数	0.0025	1.8	1.7	0.3	0.55	0.25	0.25	0.2	8.0	0.4	0.03	0.05	6.5	900

注:系统的四台发电机参数一样

附表 2 两区域系统运行工况 1

节点号	有功出力	无功出力	有功负荷	无功负荷
1	7.0	1.61	0.00	0.00
2	7.0	1.76	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	9.76	1.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
11	7.16	1.49	0.00	0.00
12	7.00	1.39	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	17.67	1.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00
101	0.00	8.00	0.00	0.00
110	0.00	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00

注:系统的工况 2、3 的各功率及负荷分别是工况 1 的 75%和 50%

附表 3 励磁系统参数

	T_R	K_A	T_A	T_B	T_C
1#机组	0.01	46	0.06	0	0
2#机组	0.01	7.04	1.0	6.67	1.0
3#机组	0.01	200	0	0	0
4#机组	0.01	300	0.01	0	0

附表 4 线路参数

线路	电阻/pu	电抗/pu
1-10	0.0	0.0167
2-20	0.0	0.0167
3-4	0.0	0.005
3-20	0.001	0.01
3-101	0.011	0.11
10-20	0.0025	0.025
11-110	0.0	0.0167
12-120	0.0	0.0167
13-14	0.0	0.005
13-101	0.011	0.11
13-120	0.001	0.01
110-120	0.0025	0.025

其中变压器支路为:3-4、13-14 且参数相同:

线路	变比	最大抽头	最小抽头	抽头步长
3-4	1.0	1.2	0.8	0.05

参考文献

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分
析[M].北京:清华大学出版社,2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory
and Analysis of Dynamic Power System [M].Beijing:
Tsinghua University Press,2002.

[2] HONG Ying-yi, WU Wen-ching. A New Approach Using
Optimization for Tuning Parameters of Power System
Stabilizers[J], IEEE Trans on Energy Conversion, 1999,
14(3):780-78.

[3] Abdel-Magid Y L, Abido M A, Al-Baiyat S, et al.
Simultaneous Stabilization of Multimachine Power
Systems via Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on
Power Systems, 1999, 14(4): 1428-1439

[4] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M].哈尔滨:哈
尔滨工业大学出版社,2002.
MO Hong-wei. The Principles and Applications of
Artificial Immune System [M]. Harbin: Harbin Institute
of Technology Press, 2002.

[5] 王磊,潘进,焦李成.免疫遗传算法[J].电子学报,2000,
28(7).
WANG Lei, PAN Jin, JIAO Li-cheng. Immune Genetic
Algorithm[J].Journal of Electronic,2000.

[6] 蒋平,黄霆,罗建裕.基于增强连续禁忌算法的 PSS 参
数优化[J].电力自动化设备,2004,24(12):19-22.
JIANG Ping, HUANG Ting, LUO Jian-yu. PSS Parameter
Optimization Based on ECTS[J]. Electric Power
Automation Equipment, 2004, 24(12): 19-22.

[7] 徐光虎,苏寅生,孙衢,等.基于特征值分析法的 PSS
最佳安装地点的确定[J].继电器,2004,32(8):1-4.
XU Guang-hu, SU Yin-sheng, SUN Qu, et al.
Identification of PSS Optimum Location Based on
Eigenvalue Analysis Method[J].Relay, 2004, 32(8): 1-4.

(下转第 45 页 continued on page 45)

- Branch-exchange Algorithm for Distribution on Networks Reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [3] 吴文传, 张伯明. 拟全局最优的配电网实时网络重构法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 69-73.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A Quasi-global Optimal Method for Real-time Network Reconfiguration of Distribution System [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 69-73.
- [4] 刘自发, 余贻鑫, 葛少云. 一种混合智能算法在配电网网络重构中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 73-78.
LIU Zi-fa, YU Yi-xin, GE Shao-yun. A Hybrid Intelligent Algorithm for Loss Minimum Reconfiguration in Distribution Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 73-78.
- [5] Victor P, Ferland J A, Miguel A, et al. Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1135-1141.
- [6] Holland J H. Genetic algorithm [J]. Scientific American, 1992, 9(7): 44-50.
- [7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
- [8] 刘扬, 杨建军, 魏立新. 改进遗传模拟退火算法在配电网网络重构中的应用 [J]. 电力系统及自动化学报, 2004, 16 (5): 39-42.
LIU Yang, YANG Jian-jun, WEI Li-xin. Application of the Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm in Distribution Network Reconfiguration [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(5): 39-42.
- [9] 卢耀川, 廖迎春, 陈星莺, 等. 基于遗传退火法的网络重构技术 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (1): 28-31.
LU Yao-chuan, LIAO Ying-chen, CHEN Xing-ying, et al. Distribution Reconfiguration Technology Based on GA and SA [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 28-31.
- [10] 李茂军, 童调生, 罗隆福. 单亲遗传算法及其应用研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 1998, 25 (6): 56-59.
LI Mao-jun, TONG Tiao-shen, LUO Long-fu. Partheno-Genetic Algorithm and Its Application [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 1998, 25(6): 56-59.
- [11] WANG Ji, LUO An, LI Mao-jun. The Improved Clonal Genetic Algorithm & Its Application in Reconfiguration of Distribution Networks [A]. In: IEEE Power Engineering Society. PSCE 2004 - Power Systems Conference and Exposition [C]. New York: 2004. 559-604.
- [12] Goswami S.K, Basu S.K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 3(7): 1484-1491.

收稿日期: 2006-09-20; 修回日期: 2006-11-22

作者简介:

周辉 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究领域为电力系统及其自动化; E-mail: zhouhui_jx@163.com

王击 (1968-), 男, 副教授, 主要从事智能控制系统分析和电力控制系统技术方面的研究。

(上接第 23 页 continued from page 23)

- [8] 王小平, 曹立明. 遗传算法 (理论、应用与软件实现) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm (Theory, Application and Software) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [9] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003.

收稿日期: 2006-11-07; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

刘杨名 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制; E-mail: liuyangming@sjtu.edu.cn

严正 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大规模电力系统优化、程序设计, 电力系统稳定分析, 电力市场。