

动态等值新方法及其在天津电网中的应用

李晓辉¹, 罗敏², 刘丽霞¹, 艾芊², 王西田², 岑海凤²

(1. 天津市电力公司技术中心, 天津 300384; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 为了研究天津电网, 提出了一种基于小生境免疫算法的估计等值新方法, 根据实时的联络线动态响应, 将外网等值成发电机, 采用小生境免疫算法对等值模型进行参数辨识。该方法成功地应用到天津电网, 仿真结果表明: 基于小生境免疫算法的估计等值法估计精度高、鲁棒性强、能避免早熟问题, 实用性强, 解决了目前估计等值法存在的参数估计难的问题。

关键词: 电力系统; 动态等值; 估计等值; 免疫算法; 小生境

A new dynamic equivalence method and its application in Tianjin grid

LI Xiao-hui¹, LUO Min², LIU Li-xia¹, AI Qian², WANG Xi-tian², CEN Hai-feng²

(1. Technology Center, Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To study Tianjin grid, this paper proposes a new evaluation equivalence method based on the niche immune algorithm, by which the external grid is equivalent to a generator and the parameters of the generator are certificated by the niche immune algorithm according to the dynamic responses of the tie line. It has been applied to Tianjin grid successfully. Simulation results show that the proposed method has good robustness, high precision, strong practicality, and can also avoid premature convergence. So it solves the difficulty of parameter estimation.

Key words: power system; dynamic equivalence; evaluation method; immune algorithm; niche

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0061-06

0 引言

随着电力系统的互联和市场化, 电网越来越庞大。对这样的大系统进行仿真计算、稳定性研究和分析控制, 越来越困难。因此, 对系统进行简化是十分有必要的。我们将系统分为研究系统(感兴趣的区域)和外部系统(距感兴趣的区域较远, 只研究其对研究系统的影响)。保留研究系统不变, 而对外部系统在保证其对研究系统的动态影响不畸变的条件下, 进行简化的过程称为动态等值^[1]。动态等值可以大大地简化网络, 减少计算机内存和计算时间, 不仅适用于交流网络, 也适用于交直流混合网络^[2]和风电场^[3]。目前的动态等值方法主要分为三大类^[1]:

①基于发电机相关概念的同调等值法^[4-6];

②基于线性化系统模型和特征值分析的模态等

值法^[7];

③基于在线测量和参数估计的估计等值法^[8-11]。

对于前面两种方法, 工程应用已经较多。前两种方法都存在需要已知外部系统完整的结构和参数的缺点。同调等值法适用于大扰动下的暂态稳定分析, 模态等值法适用于小扰动下的动态稳定分析, 均用于离线分析。前两种方法都在不断完善中, 文献[12]提出弱耦合的发电机相关识别算法, 将不同子系统之间的影响简化成一个参数, 文献[13]提出在保留研究系统发电机的前提下, 增加一个研究系统和外部系统之间的缓冲网络, 如模糊控制法^[14]、神经网络法^[14]都开始引入到同调等值法。这些方法的改进与完善, 虽然提高了等值的速度或者精度等, 但是不能满足电力市场和在线安全分析的要求。在实时在线安全分析中, 由于系统的结构、运行工况多变, 常常需要对外部系统作在线的实时的动态等值, 而估计等值法既不需要知道外部系统的参数, 又具有实时性强的特点, 所以非常适用于在线动态

基金项目: 电力系统国家重点实验室开放基金重点项目
(SKLD09kz07)

安全分析。但是估计等值法由于其采用模型的非线性化和对线辨识的要求，所以目前应用较少。

因此，本文提出了一种估计速度快，等值精度较高，实用性较强的基于小生境免疫算法的估计等值法。采用单机-无穷大系统的算例验证了该方法的有效性和准确性，最后将该方法应用到天津电网的等值。算例结果表明，采用本文提出的等值新方法等值外电网，能够大大地简化大电网规模，等值的精度较高，适用于实时在线安全分析。

1 小生境免疫算法简介

1.1 免疫算法的原理

免疫系统的主要功能是产生抗体以清除抗原，具有学习、记忆和自调节的能力。当抗原侵入人体后，免疫系统将会产生抗体并与抗原相结合，当它们的亲和力超过一定的阈值时，抗体被活化进行克隆扩增，随后克隆细胞经历高频变异过程，产生对抗原具有特异性的抗体。

免疫算法是一种模拟上述人体免疫系统的学习、记忆等功能来进行模型识别和寻优搜索的人工智能算法^[16-23]。免疫算法将抗原和抗体分别对应于优化问题的目标函数和可行解。把抗体和抗原的亲和力视为可行解与目标函数的匹配程度；用抗体之间的亲和力保证可行解的多样性。通过计算抗体生存力来控制相同可行解的过多产生；用记忆细胞单元保存择优后的可行解来抑制相似可行解的继续产生。

1.2 引入小生境的概念

免疫算法鲁棒性好，全局优化、并行性和智能性高的特点，已广泛用于电力系统中负荷预测、电源规划、无功优化、最优潮流和故障诊断^[16-20]等，但传统的免疫算法也存在早熟的问题。为了解决早熟的问题，增强免疫算法的全局寻优能力，本文对传统的免疫算法进行了改进，引进了小生境的概念。

在生物学中，小生境(Niche)是指特定的生存环境。生物在其进化过程中，一般总是与自己相同的物种生活在一起。免疫算法中引进小生境的概念，让种群中的个体在不同特定的生存环境中进化，而不是全部聚集在一种环境中。这样可以使算法在整个解空间中搜索，以找到更多的最优个体。引入小生境技术之后，多样性得以增加，早熟问题得以解决。

1.3 小生境免疫算法的流程

小生境免疫算法流程分为种群的产生与进化两部分，种群分不同的小生境产生以后开始种群的进化。流程图如图 1 所示。

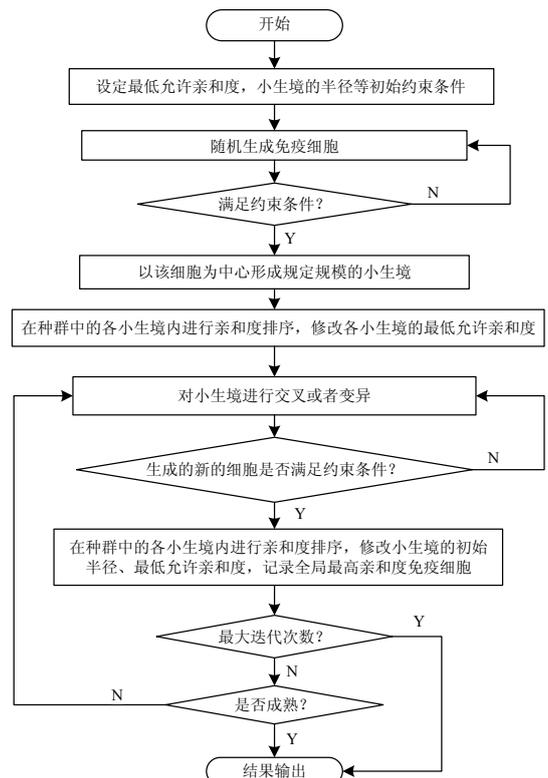


图 1 小生境免疫算法的流程图

Fig.1 Flow chart of the niche immune algorithm

(1) 种群的产生

- ① 设定最低允许亲和度、小生境初始半径等约束条件。
- ② 随机生成一个免疫细胞，若合格则以它为中心产生一个小生境。
- ③ 重复步骤②，直至生成规定规模的种群。
- ④ 对种群按小生境内亲和度的排序，修改最低允许亲和度。

(2) 种群的进化

- ① 对种群中的小生境作交叉和突变操作；随机决定进行交叉操作还是突变操作。对于本轮中新产生的小生境，暂不作交叉与突变操作。
- ② 对小生境按亲和度排序；修改小生境的初始半径，修改最低允许亲和度，修改全局最高亲和度免疫细胞基因。
- ③ 判断最高亲和度小生境是否成熟，若成熟则退出，否则转①。

2 应用于估计动态等值法

2.1 估计等值的基本思想

估计等值法是利用边界联络线信息估计等值模型的方法。对于估计等值模型结构问题，目前存在着两种基本模型结构，一种直接将联络线的外网进

行等值^[8,10], 一种是包括外网间联络线的等值模型^[9]。文献[9]提出了将 3 区域互联的电网中的外网等值成带有联络线的模型, 等值模型对外网的拟合较好, 在 36 节点的算例中得到了较好的结果, 但是对于多区域的大电网的等值, 这样的等值模型会给参数估计带来很大困难。因此本文针对天津电网这样一个与外网连接较多, 而且外部系统之间的联络线距离天津电网较远的情况下, 采用直接将与研究系统的外网进行等值的模型结构。在天津电网作为一个受端电网, 而且在高压端进行等值, 外网对它的电压支撑作用较大, 所以外网的电源特性比较突出, 负荷特性不明显, 故未考虑挂负荷。

本文根据天津电网的上述特点, 提出在天津电网中采用一种简单实用的等值模型, 即对外部系统进行等值时, 将研究系统与外部系统之间的联络线等值成一台发电机。为了保证等值的精度, 采用的发电机模型可为六阶微分模型:

$$\begin{cases} T_{q0}' p e_d' = -\frac{X_q' - X_q''}{X_q' - X_q''} e_d' + \frac{X_q' - X_q'}{X_q' - X_q''} e_d'' \\ T_{q0}'' p e_d'' = e_d' - e_d'' + (X_q' - X_q'') i_q \\ T_{d0}' p e_q' = -\frac{X_d' - X_d''}{X_d' - X_d''} e_q' + \frac{X_d' - X_d'}{X_d' - X_d''} e_q'' + E_{fq} \\ T_{d0}'' p e_q'' = e_q' - e_q'' - (X_d' - X_d'') i_d \\ p \delta = \omega - 1.0 \\ T_J p \omega = T_m - T_e - D(\omega - 1.0) \end{cases} \quad (1)$$

以上方程组为状态向量方程。

其中:

$par = [R_a \ T_{d0}' \ T_{d0}'' \ T_{q0}' \ T_{q0}'' \ X_q' \ X_q'' \ X_d' \ X_d'' \ X_d \ X_q \ T_J \ D]$ 为待辨识的参数向量。

衡量参数优劣的误差指标:

$$J = (P_1 - P_2)^2 + (Q_1 - Q_2)^2 \quad (2)$$

式中: $[P_1 \ Q_1]$ 为辨识模型计算得到的输出量, $[P_2 \ Q_2]$ 为测量得到的输出量。

辨识参数的过程就是寻找一组参数 par^* , 使误差指标尽量地小, 即目标函数为:

$$\min J(par^*) \quad (3)$$

2.2 基于小生境免疫算法的等值模型参数辨识

现有的估计等值法中的等值模型参数辨识采用的大多数为最小二乘法^[11]。最小二乘法主要是用于解决线性问题, 而且存在着收敛困难的缺点。所以本文提出了将优化搜索能力强、能避免早熟和个体退化的小生境免疫算法将用于动态等值中发电机模

型的参数辨识。

将待辨识的参数作为抗体, 将式(3)中的目标函数视为抗原, 抗体和抗原之间亲和度的计算公式为:

$$f = 1/J \quad (4)$$

随机地生成满足发电机参数要求的初始抗体, 然后以初始抗体为中心生成小生境, 根据小生境的进化规则, 对抗体进行寻优, 直至找到亲和度最高即目标函数最小的一组参数, 即为辨识得到的参数。

3 单机接无穷大系统校核

在系统中设置三相短路后, 将得到联络线响应作为发电机辨识的量测数据。采用小生境免疫算法对发电机进行参数辨识, 得到的结果和实际的发电机参数比较如表 1 所示。辨识得到的发电机模型的输出曲线和实际的发电机输出曲线比较, 如图 2 所示。为了校核辨识得到的发电机模型的内推外插能力, 比较在单相短路情况下, 实际发电机模型的输出和用辨识得到的发电机模型的输出, 如图 3 所示。

表 1 发电机辨识参数和实际参数比较

Tab.1 Comparison of the identified parameters and the real parameters of the generator

参数	准确值 /p.u.	辨识值 /p.u.	参数 /p.u.	准确值 /p.u.	辨识值 /p.u.
R_a	0	9.9E-6	T_{d0}'	6	3.456 3
X_d	2.902 4	2.901 6	T_{q0}'	0.54	0.396 5
X_q	2.801 0	2.884 8	T_{d0}''	0.033	0.025 4
X_d'	0.385 2	0.426 2	T_{q0}''	0.078	0.079 6
X_q'	0.638 0	0.603 0	T_J	6.666 7	6.399 7
X_d''	0.288 4	0.194 7	D	0	2.3E-6
X_q''	0.288 4	0.153 0			

结果分析:

(1) 由表 1 可知, 辨识得到的发电机的参数与实际的发电机参数十分接近, 说明这些发电机参数是可辨识的, 由于该方法侧重于全局寻优, 所以某些参数会误差稍大, 但不影响整个动态仿真的精度。

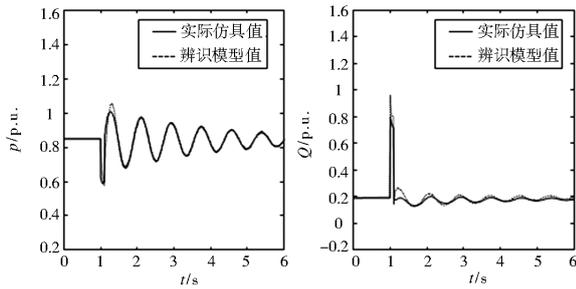


图2 三相短路有功和无功曲线

Fig.2 Active and reactive curve of three-phase short-circuit fault

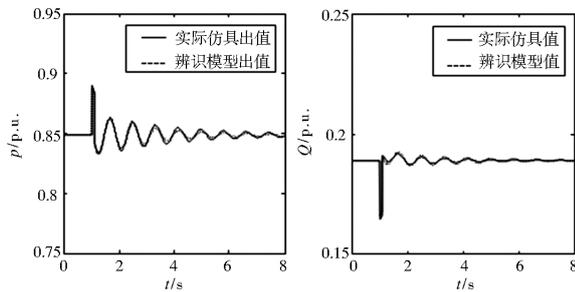


图3 单相短路的有功和无功曲线

Fig.3 Active and reactive curve of signal-phase short-circuit fault

(2) 从图2可见, 辨识得到的发电机的输出曲线与实际的输出曲线拟合很好, 误差较小, 因此说明免疫算法的鲁棒性较好, 有很好的寻优能力。

(3) 由图3可知, 辨识得到的发电机模型不仅能够很好地拟合实际发电机在三相短路时的响应, 在单相短路时与实际发电机的响应也完全吻合, 因此辨识得到的具有很好的外推内插能力。

因此, 小生境免疫算法用于发电机辨识是完全可行的, 并且误差很小, 精度较高。

4 天津电网实际等值计算

由上述单机无穷大的例子说明基于免疫算法的动态等值的可行性和有效性, 因此可将其用于天津电网。天津电网与外部系统的联络线共有4条联络线, 因此可用4个等值机分别等值。

4.1 等值模型的辨识

在天津电网内部设置三相短路, 监测联络线的响应, 记录下各条联络线的电压、电流、有功、无功。根据上述测量数据进行等值模型参数辨识。以北郊~安定 500 kV 联络线等值机为例, 表2为辨识得到的等值机参数, 等值机的动态响应曲线与实际测量数据的比较如图4所示。

表2 辨识得到的北郊等值机的参数(标么值)

Tab.2 Parameters of identified Beijiao equivalent generator

参数名	辨识值 /p.u.	参数名	辨识值 /p.u.	参数名	辨识值 /p.u.
R_a	0.221	X_d''	7.127 5	T_{q0}''	0.085 4
X_d	16.310	X_q''	0.320 6	T_J	0.018 4
X_q	10.784	T_{d0}'	7.958 7	D	14.37 4
X_d'	7.196	T_{q0}'	9.914 1		
X_q'	10.377	T_{d0}''	0.512 9		

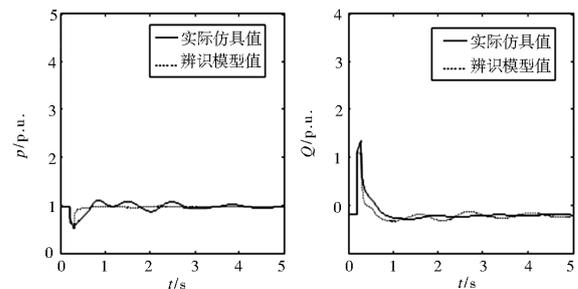


图4 北郊母线的响应曲线

Fig.4 The Beijiao bus responses curves

4.2 结果分析

(1) 由图4可知, 单机等值模型的输出与实际的电网间联络线的响应曲线吻合较好, 说明了这种等值模型的有效性。

(2) 由表2可知, 等值机的参数与普通发电机的参数有一定的差别, 这是因为等值机参数不是发电机物理的参数, 是通过辨识寻优得到的, 是对动态曲线拟合得最好的一组数据。

5 结论

本文在利用联络线响应进行动态等值的估计等值法的基础上, 将外部系统等值成一台发电机, 提出了用小生境免疫算法的新方法辨识发电机模型参数, 通过上述算例仿真, 得到的结论:

(1) 小生境免疫算法鲁棒性强、能够较快收敛到全局最优解, 避免了早熟问题。

(2) 算例表明采用基于小生境免疫算法的动态等值法得到的等值模型能够很好地拟合外部系统的动态响应, 精度较高, 实用性强, 解决了估计等值

法的参数辨识难的问题, 能够满足实时在线安全分析的要求。

参考文献

- [1] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 等. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 330-349.
- [2] 赵良, 李蓓, 卜广全, 等. 云南-广东±800kV 直流输电系统动态等值研究[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 6-10.
ZHAO Liang, LI Bei, BU Guang-quan, et al. Study on Dynamic Equivalence of ±800 kV DC Transmission System from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 6-10(in Chinese).
- [3] 孙剑峰, 焦连伟, 吴俊玲, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 58-61.
SUN Jian-feng, JIAO Lian-wei, WU Jun-ling, et al. Research on Multi-machine Dynamic Aggregation in Wind Farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 58-61(in Chinese).
- [4] 杭乃善, 李如琦, 等. 同调机群的不对称 Y 阵动态等值法[J]. 电网技术, 2000, 24(16): 34-36.
HANG Nai-shan, LI Ru-qi, et al. Unsymmetric Y matrix Dynamic Equivalence for Coherence Generator Groups[J]. Power System Technology, 2000, 24(16): 34-36(in Chinese).
- [5] 杨靖萍, 徐政, 等. 基于同调机群识别的动态等值方法的工程应用[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 68-71.
YANG Jing-ping, XU Zheng, et al. Application of Dynamic Equivalence based on Identification of Coherent Generator Group in Engineering[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 68-71(in Chinese).
- [6] 胡杰, 余贻鑫, 等. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 26-30.
HU Jie, YU Yi-xin, et al. A Practical Method of Parameter Aggregation for Power System Dynamic Equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 26-30(in Chinese).
- [7] Kim J Y, Won D J, Moon S. Development of Dynamic Equivalent Model for Large Power System[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. Vancouver(Canada): 2001. 973-977.
- [8] 倪腊琴, 鞠平, 李训铭, 等. 电力系统动态等值的在线辨识研究(II) — 辨识方法及仿真检验[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 20-22.
NI La-qin, JU ping, LI Xun-ming, et al. On-line Identification of Power System Dynamic Equivalent Part Two Parameter Estimation & Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 20-22(in Chinese).
- [9] 鞠平, 王卫华, 谢宏杰, 等. 3 区域互联电力系统动态等值的辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 29-31.
JU Ping, WANG Wei-hua, XIE Hong-jie, et al. Identification Approach to Dynamic Equivalents of Power Systems Interconnected with Three Areas[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 29-31(in Chinese).
- [10] 倪腊琴, 鞠平, 李训铭, 等. 电力系统动态等值的在线辨识研究(III) — 几个重要问题探讨[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 33-36.
NI La-qin, JU Ping, LI Xun-ming, et al. On-line Identification of Power System Dynamic Equivalent Part Three Analysis of Several Important Issues[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 33-36(in Chinese).
- [11] 康义, 周献林, 谢国恩, 等. 用 NETOMAC 程序进行电力系统动态等值研究[J]. 电网技术, 1998, 22(5): 21-24.
KANG Yi, ZHOU Xian-lin, XIE Guo-en, et al. Using NETOMAC Program in System Equivalent Study[J]. Power System Technology, 1998, 22(5): 21-24(in Chinese).
- [12] 王成山, 杜瑞建, 张家安, 等. 区域互联电力系统同调机群的分布式协同识别[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 9-13.
WANG Cheng-shan, DU Rui-jian, ZHANG Jia-an, et al. Distributed Identification of Coherent Generators for Interconnected Areal Power Systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 9-13(in Chinese).
- [13] 王刚, 张伯明, 等. 电力系统外网动态等值方案[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 21-26.
WANG Gang, ZHANG Bo-ming, et al. External Online Dynamic Equivalents of Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 21-26(in Chinese).
- [14] 赵书强, 常鲜戎, 潘云江, 等. 电力系统同调机群识别的一种模糊聚类方法[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 10-13.
ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong, PAN Yun-jiang, et al. A Fuzzy Clustering Method for Coherent Generator Groups Recognition in Power System[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 10-13(in Chinese).
- [15] Veeramantv T N, Shivanna K T. Coherency Identifications Using Growing Self-organizing Feature Maps Power System Stability[A]. in: Proceeding of Energy Management and Power Delivery(EMPD'98) [C]. Singapore: 1998. 113-116.
- [16] 王磊, 潘进, 焦李成, 等. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74-78.

WANG Lei, PAN Jin, JIAO Li-cheng, et al. The Immune Algorithm[J]. ACTA Electronic Sinica, 2000, 28 (7): 74-78(in Chinese).

[17] Endoh S, Toma N, Yamada K. Immune Algorithm for n-TSP[A]. in: 1998 IEEE Internal Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C]. 1998. 3844-3849.

[18] 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(in Chinese).

[19] 殷桂梁, 肖丽萍, 吴长奇, 等. 免疫原理用于异步电动机故障诊断的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 132-136.
YIN Gui-liang, XIAO Li-ping, WU Chang-qi, et al. Squirrel-cage Motors Fault Diagnosis Using Immunology Principles[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 132-136.

[20] 谢开贵, 周家启, 等. 基于免疫算法的配电网开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (15): 35-39.
XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi, et al. Model for Optimal Switching Devices Based on Immune Algorithm in Electric Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (15): 35-39(in Chinese).

[21] 黄弦超, 舒隽, 张粒子, 等. 免疫禁忌混合智能优化算法在配电网检修优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (11): 96-100.
HUANG Xian-chao, SHU Jun, ZHANG Li-zi, et al. Distribution Maintenance Scheduling Using an Intelligent Opt Approach Mixed Immune Algorithm and Tabu Search [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (11): 96-100(in Chinese).

[22] 刘科研, 盛万兴, 李运华, 等. 基于改进免疫遗传算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 11-16.
LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing, LI Yun-hua, et al. Reactive Power Optimization based on Improved Immunity Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31 (13): 11-16(in Chinese).

[23] 熊虎岗, 程浩忠, 胡泽春, 等. 基于混沌免疫混合算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31 (11): 33-37.
XIONG Hu-gang, CHENG Hao-zhong, HU Ze-chun, et al. A Hybrid Algorithm based on Chaos Optimization Algorithm and Immune Algorithm for Multi-objective Optimal Reactive Power Flow[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 33-37(in Chinese).

收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2009-06-18

作者简介:

李晓辉 (1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统规划和电能质量管理技术的研究;

罗敏 (1985-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定等;

刘丽霞 (1981-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统规划和电力系统计算工作. E-mail: liulixia0808@163.com

(上接第 60 页 continued from page 60)

[4] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 数字电流差动保护中几种采样同步方案[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (9): 46-49, 53.
GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang, HE Jia-li. Sampling Synchronization Methods in Digital Current Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49, 53.

[5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第3版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHU Sheng-shi. Principles and Technology of Relay

Protection in HV Power System, 3rd ed[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2009-03-26

作者简介:

张兆云 (1977-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统继电保护和数字化变电站的研究; E-mail: zhangzhaoyun@sina.com

刘宏君 (1974-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统继电保护和数字化变电站的研究;

张润超 (1970-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护和运动技术的研究。