

# 基于改进遗传算法的非线性发电机励磁系统参数辨识

丁富春<sup>1</sup>,张明龙<sup>2</sup>,李晋<sup>1</sup>,宋福海<sup>2</sup>

(1. 江门恩平供电分公司, 广东 江门 529400; 2. 福建省电力试验研究院, 福建 福州 350003)

**摘要:** 为了确保电力系统建模的精确性和安全稳定分析的可靠性,进行发电机励磁系统参数辨识测试是一项重要的工作。提出采用改进的 GA 遗传算法应用于发电机励磁系统的非线性参数辨识,利用 GA 较强的全局寻优能力和 BP 梯度法较强的局部搜索能力,较快同时又较好地辨识出发电机励磁系统参数估计值。实际发电机励磁系统参数测试试验结果表明,基于改进遗传算法的励磁系统参数辨识方法计算速度快,精度高,鲁棒性强,为非线性发电机励磁系统的参数辨识提供了一种有效的新方法。

**关键词:** 发电机励磁系统; 非线性参数辨识; 遗传算法; 梯度法

**中图分类号:** TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)09-0027-04

## 0 引言

开展励磁系统建模和参数测试工作对电网安全稳定运行和各发电企业安全经济发供电具有重要意义,也是全国联网后,进行联合电网运行管理的一项重要工作。随着超高压电网的建成及大容量发电机组在电网中不断的投运,发电机励磁系统及其电力系统稳定器(PSS)对电力系统的电压控制和稳定控制具有十分重要的作用,影响系统动态过程,有必要对大型发电机组励磁系统的动态性能进行分析,而励磁系统性能的好坏取决于其参数的设置<sup>[1]</sup>。同时,在电力系统稳定计算分析中广泛采用发电机励磁系统数学模型来描述发电机励磁系统物理过程,发电机励磁系统模型作为电力系统机电暂态过程数学模型的重要组成部分,其模型参数设置正确与否直接决定电力系统稳定计算的正确性和可信度,影响电力系统机电暂态过程模拟的精确性。因此对实际励磁系统的数学模型与参数进行正确的测定和试验是全网精确建模和安全稳定分析的关键。

线性励磁系统参数的测定和试验通常可以通过频域分析法<sup>[2]</sup>和时域最小二乘分析法<sup>[3]</sup>来实现。但实际发电机励磁系统中一般都存在限幅环节等因素影响,不再是一个简单的线性模型,扰动稍大就可能使得励磁系统中某些环节进入非线性区,同时频域辨识测试中的伪随机码选择受辨识系统各个环节时间常数的影响,特别是当系统中各个环节时间常数相差很大时,频域法辨识结果精度很难保证,因此传统的辨识方法不能很好地解决非线性发电机励磁系统参数辨识问题。但遗传算法所具有的学习能力及非线性特性能有效地解决复杂非线性系统的辨识

问题。本文将遗传算法和基于梯度下降算法 BP 的静态前馈神经网络结合起来,应用于发电机励磁系统的参数辨识,给出了改进遗传算法参数辨识的基本原理和实测辨识结果比较。现场试验测试辨识结果表明,基于改进遗传算法的励磁系统参数辨识方法能有效减少收敛到全局最优的时间,同时精度高,鲁棒性强,具有一定的工程使用价值。

## 1 改进遗传算法基本原理

遗传算法(Genetic Algorithm)是基于自然遗传学机理的随机优化概率搜索算法<sup>[4]</sup>。其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换,搜索不依赖于梯度信息,具有全局性、并行性、快速性、较好的适应性和鲁棒性<sup>[5]</sup>。尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题,已被广泛应用于自适应控制、规划设计等领域。

遗传算法通过群体搜索策略和群体中个体之间的信息相互交换,模拟由个体组成的群体的整体学习,从任一初始化的群体出发,通过随机选择、交叉和变异等遗传操作,使群体一代代地优化,直至抵达最优解点。GA 算法的一般运算过程如图 1 所示。

- 1) 编码策略:对所需优化的参数进行染色体位串编码;
- 2) 初始种群:产生初始种群;
- 3) 适合度的评价:对群体进行评价,求出每个个体的适应度值;
- 4) 遗传操作:根据个体适应度对群体中的个体进行选择、交叉、变异遗传操作;
- 5) 进化:生成新一代的群体。

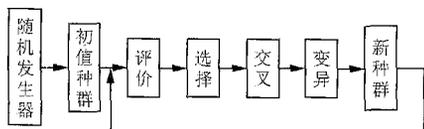


图 1 标准遗传算法框图

Fig 1 Block diagram of standard GA

遗传算法是一种并行算法,由于它是基于模式处理的方法,因此能够对数据空间进行全局搜索,以较大的概率收敛到全局次优点。但由于遗传算法不能有效地利用局部信息,因此收敛到最优点需要较长时间。而梯度法是基于梯度这个局部信息来搜索的方法,搜索速度较快,但单独使用梯度法很容易陷入局部最优点。把二者结合起来,先利用遗传算法搜索到全局次优点,再利用基于梯度下降算法 BP 神经网络对全局次优点进行进一步搜索,可以较快地搜索到全局最优点。在系统辨识中可以较快地得到较好的参数估计值。

采用基于梯度下降算法的前向三层 BP 网络来对全局次优点进行寻优,快速求解全局最优点。输入层神经元个数为  $m$ , 隐含层神经元个数为  $n$ , 则三层 BP 网络输出可以表示为:

$$Y_i = W_2 f(W_1 X_i + b_1) + b_2 \quad (1)$$

其中:  $X_i = [x_0, \dots, x_{m-1}]^T$  为 BP 网络输入全局次优向量;  $W_1$  是连接输入层和隐含层的  $n \times m$  维系数矩阵;  $W_2$  是连接隐含层和输出层的  $n \times 1$  维系数矩阵;  $b_1$  是隐含层神经元的偏差;  $b_2$  是输出神经元的偏差;  $f(\cdot)$  为变换函数取为 Sigmoid 函数,即

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

训练网络权值的性能指数函数定义为:

$$J(i) = E | \hat{S}_i - Y_i |^2 = E | S_i - Y_i |^2 \quad (2)$$

其中:  $\hat{S}_i$  为理想输出;  $\hat{S}_i - Y_i$  为误差函数。

因此,性能指数函数的梯度为:

$$\frac{\partial J(i)}{\partial} = \hat{S}_i \left( \frac{\partial Y_i}{\partial} \right) \quad (3)$$

其中:  $\hat{S}_i$  代表 BP 网络的各系数  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $b_1$ ;  $\frac{\partial Y_i}{\partial}$  可以通过标准的 BP 算法求解得到。

调整 BP 网络系数的递推算法为<sup>[6]</sup>:

$$w_{n+1} = w_n + \mu \cdot \frac{\partial J(i)}{\partial} \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为学习因子。

利用遗传算法计算出全局次优点后,将全局次

优点作为梯度法计算的输入值,通过 BP 神经网络运算后可得到全局最优值。

## 2 基于改进遗传算法的系统参数辨识

系统参数辨识就是按规定准则在一类模型中选择一个与数据拟合得最好的模型,要求由物理定律确定数学模型中的未知参数,使该数学模型等价于真实系统。它的基本过程是:首先规定一代价函数,它是量测误差的函数。通过系统仿真,求出与实际系统在相同的激励信号作用下的模型输出  $\hat{Y}$ , 然后比较模型输出  $\hat{Y}$  与系统的实际输出  $Y$  这两者的差异,构成误差函数,利用误差函数来不断修正数学模型中的未知参数<sup>[7]</sup>。当误差函数取极小值时,就认为此时数学模型的参数即是待辨识系统的参数。

发电机励磁系统参数辨识问题实际上就是通过适当选取数学模型中未知参数使误差函数值达到极小值的问题。如果将发电机励磁系统数学模型中未知参数的可能取值范围按照一定的精度进行细化,那么可行解集合就是未知参数的所有可能取值的组合。利用遗传算法的空间快速并行搜索能力,就可以在庞大的可行解集合中找到问题的最优解。这就是遗传算法应用于电力系统参数辨识的基本思想。但直接应用遗传算法进行参数辨识需要全局寻优时间很长,而梯度下降法的计算速度比遗传算法快得多,将标准遗传算法和基于梯度下降算法 BP 神经网络结合,采用改进遗传算法在寻优上比单纯遗传算法快得多<sup>[8]</sup>。基于改进遗传算法的系统参数辨识原理如图 2 所示:

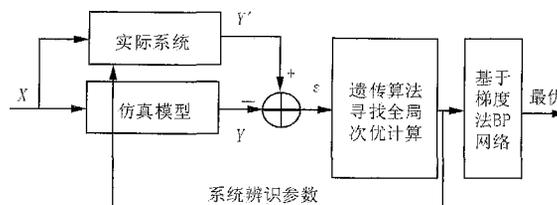


图 2 改进遗传算法的系统辨识原理框图

Fig 2 Block diagram of parameter identification based on improved GA

改进遗传算法用于非线性发电机励磁系统参数辨识的基本步骤如下:

1) 编码:采用二进制编码方案,采用 16 位二进制串表示一个参数,四个参数则采用 64 位。设辨识参数范围为  $[x_{\min}, x_{\max}]$ , 则表现型参数  $X$  与基因型参数  $Y$  对应的映射关系为:

$$X = \min + Y \cdot \frac{\max - \min}{2^{16} - 1} \quad (5)$$

2) 种群初始化。设定种群规模为 50,根据厂家提供参数选择初始值及其对应范围。交叉概率设为 0.8,变异概率设为 0.05。

3) 适应度评价。采用误差平方测度为评价函数进行适应度评价。

$$E = \sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i|^2, \text{其中 } N \text{ 为采样次数。}$$

适应度函数取为:  $f = C_{\max} - E$

其中  $C_{\max}$  为适应度设定值。

误差函数值越小,该个体的适应度越大,当误差函数值大于适应度设定值时,该个体的适应度为零,将被淘汰。

4) 遗传算子。本系统采用比例选择算子、单点交叉算子、基本位变异算子。交叉和变异采用改进的自适应交叉率和变异率,交叉率和变异率基于个体的适应度值来改变。

5) 生成新群体。适应度最大的个体取代新群体中适应度最小的个体。

6) 反复进行适应度评价、遗传操作、生成新群体操作,判断群体代数是否达到设定值。

7) 选择遗传算法得到的可能全局次优解,分别以这些进化解为初始解,用基于梯度法 BP 网络求解;比较求得的最优解,获得全局最优解。

### 3 发电机励磁系统参数 GA 辨识结果

某模拟励磁调节器 (AVR) 的传递函数框图如图 3 所示 (原模型描述), 90R 设定值为 10, PSS 不投入运行,发电机空载运行。在信号综合端口加一阶跃扰动信号,分别录波 VED、SMX、THY、GEN 环节的输出,利用阶跃扰动信号和各个环节录波波形数据,采用改进遗传算法实现发电机励磁系统参数辨识。

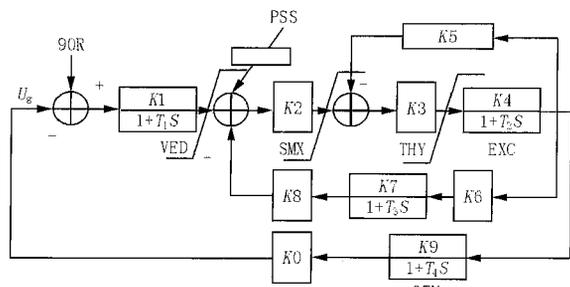


图 3 发电机励磁系统传递函数框图

Fig 3 Transfer function of generator excitation system

仿真模型采用 Matlab 的 SMULNK 模块来建

立,设置全局变量。模型中的扰动信号从实际的阶跃信号录波数据读入,系统在扰动作用下的响应通过运行 SMULNK 模块实现。系统采样率与实际录波采样率一致,进化代数为 100,群体规模为 50。利用遗传算法进行辨识得到的各个环节的结果如图 4 所示,其适应度的变化曲线如图 5 所示。辨识得到的各个环节参数如表 1 所示。

表 1 基于基本 GA 算法和改进 GA 算法的辨识结果

Tab 1 Results of parameters based on standard GA and improved GA

参数	K1	T1	K3	T2	T3	T4
GA (20)	4.67	0.006 4	125	1.06	0.841	7.2
GA (100)	4.83	0.008 5	148	1.27	0.927	7.9
GA (20) +BP梯度	4.92	0.009 1	161	1.36	0.965	8.2
GA (100) +BP梯度	4.96	0.009 8	169	1.41	1.002	8.5
最佳拟合参数	5.00	0.010 0	168	1.40	1.000	8.4

从图 4 系统输出比较可见,经过 100 代进化代数后辨识系统输出和实际系统输出一致,相同的扰动信号下两个系统响应相同表明辨识得到的系统可以表征实际物理系统,因此辨识得到系统参数也是准确的,确定辨识系统的可靠性。

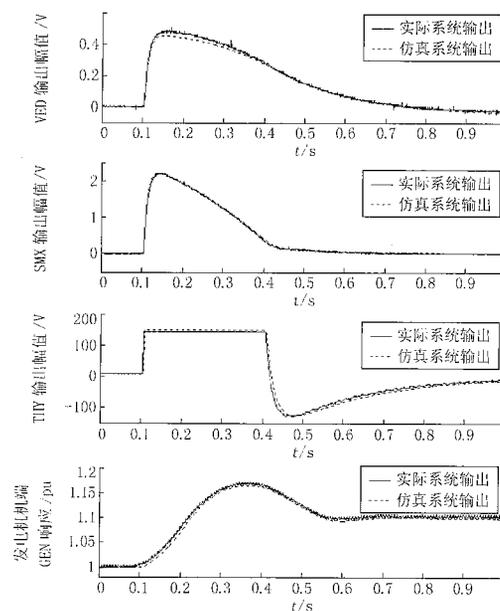


图 4 实际系统输出与辨识系统输出比较

Fig 4 Output results comparison of experiment system and identification system

从图 5 的适应度变化曲线可知,改进遗传算法经过 20 次遗传代数后,适应度基本稳定。以励磁系统动态特性的拟合程度最佳时得到的数学模型辨识参数作为待辨识系统的最佳拟合参数。表 1 列出了基于基本 GA 算法的辨识结果和基于改进算法的辨识结果。表 1 表明改进遗传算法在相同的遗传代数

下可以使系统辨识参数有效减少收敛到全局最优所需的遗传代数,缩短了计算时间,改进遗传算法辨识速度快,辨识得到的参数估计值更接近最佳拟合参数。基于改进 GA 算法的辨识响应和现场录波一致,动态特性拟合精度较高,辨识得到的励磁系统参数可靠性较高,辨识得到的参数能较精确地模拟实际发电机励磁系统。

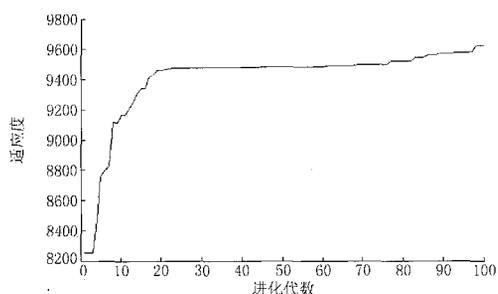


图 5 适应度的变化曲线

Fig 5 Curve of adaptability variation

#### 4 结语

本文提出采用改进的 GA 遗传算法应用于非线性发电机励磁系统的参数辨识,改进算法将遗传算法全局搜索能力强的特点和梯度下降法局部搜索能力强的特点有效结合,增强了遗传算法的辨识效果。基于改进遗传算法的励磁系统参数辨识方法计算速度快,精度高,具有很强的鲁棒性,可以有效解决复杂非线性参数辨识问题,为非线性发电机励磁系统的参数辨识提供了一种有效的新技术。

#### 参考文献:

- [1] 邵伟,徐政. 励磁系统参数整定研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 12-17.  
SHAO Wei, XU Zheng Study on Parameter Setting of Excitation System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 12-17.
- [2] 蒋平,戴列峰,等. 频域法在励磁系统参数辨识中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 30-33.  
JIANG Ping, DA I L ie-feng, et al Application of Fre-

quency Domain Method in Parameter Identification for Excitation Systems of Generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 30-33.

- [3] 王良,沈善德,等. 基于 EE模型的励磁系统参数时域辨识法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 25-28  
WANG Liang, SHEN Shan-de, et al A Method of Time Domain Identification Based on EE Model for the Excitation System Parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 25-28
- [4] 陈国良,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 1996  
CHEN Guo-liang, et al Genetic Algorithm and Application[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1996
- [5] 戴义平,邓仁纲,等. 基于遗传算法的汽轮机数字电液调节系统的参数辨识研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 101-104.  
DA I Yi-ping, DENG Ren-gang, et al Study on Parameter Identification for Steam Turbine DEH Governing System Based on Genetic Algorithm [J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(7): 101-104.
- [6] Hagan M T, Demuth H B, Beale M. Neural Network Design[M]. Beijing: China Machine Press and CITIC Publishing House, 2002.
- [7] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.  
SHEN Shan-de Identification of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [8] Wooldridge M J, Jennings N R. Intelligent Agents: Theory and Practice [J]. Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152

收稿日期: 2004-08-02; 修回日期: 2004-08-27

作者简介:

丁富春(1970-),男,工程师,主要从事电力系统继电保护和发配电设备运行工作; E-mail: yongtougao@sohu.com

张明龙(1976-),男,硕士,从事电力系统及其自动化专业试验研究工作;

李晋(1981-),男,助理工程师,主要从事电力系统继电保护和电网调度管理工作。

#### Parameters identification of nonlinear generator excitation system based on an improved genetic algorithm

DING Fu-chun<sup>1</sup>, ZHANG Ming-long<sup>2</sup>, LI J in<sup>1</sup>, SONG Fu-hai<sup>2</sup>

(1. Enping Power Supply Company of Jiangmen Power Corporation, Jiangmen 529400, China;

2. Fujian Electric Power Test and Research Institute, Fuzhou 350003, China)

(下转第 69页 continued on page 69)

WATCH - DOG,受到干扰时,都能使系统复位,避免死机。

## 5 低频减载装置的检测

该装置在进行动模试验时,接入 8路负荷量,使每个出口控制的负荷减少。这样,使所切除的负荷与实际功率缺额更加接近。

经试验表明:该装置不拒动,不误动,测量准确,动作可靠。动态试验时,将输入信号的频率按一定速率下降,装置按整定值正确切除负荷,数据显示准确。进行相应的电磁干扰等试验,装置不误动,运行正常。进行绝缘、热性能、湿热、震动等各种试验,结果符合国家相关标准。

## 6 结论

本文介绍了基于高性能数字信号处理器 TMS320C32的新型低频减载装置。DSP器件的高速处理能力与可靠性,使得它很适用于高分辨率、高采集率以及高速计算的场合。该装置能准确快速地测量频率及其变化率,判断出系统内功率缺额的大小,因而能实现事故时快速切负荷,并且使切除的负荷量与功率缺额值接近,能很快抑制系统频率的下降,确保电网的安全及对重要用户的供电质量,对电力系统的安全稳定运行发挥重要作用。

## 参考文献:

[1] 杨冠城. 电力系统自动装置原理 [M]. 北京:中国电力

出版社, 1995.

YANG Guan-cheng Electric Power System Automechanism Theory [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[2] 罗士萍. 微机保护实现原理及装置 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

LUO Shi-ping Microcomputer Protection Implementation Theory and Device [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[3] TI Company. TMS320C3X User's Guide [EB/OL]. <http://www.ti.com>.

[4] Shih L J, Lee W J, Gu J C, et al Application of df/dt in Power System Protection and Its Implementation in Microcontroller Based Intelligent Load Shedding Relay [A]. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 1991. 11-17.

[5] 秦明亮,杨秀朝. 减少低频减载过切的措施研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(3): 83-86

Q N Ming-liang, YANG Xiu-chao Measures to Reduce Over-shedding Caused by Under-frequency Load Shedding Project [J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86

收稿日期: 2004-08-04

作者简介:

裴健 (1978 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统新型低频减载方案设计; E-mail: pjian@163.com

栾兆文 (1960 - ),男,教授,从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

## Study of the new UFLS device based on DSP

PEI Jian, LUAN Zhao-wen

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A new under-frequency load shedding (UFLS) device based on TMS320C32 DSP is developed. The operation principle, hardware structure and software design are introduced. In order to reduce the time-delay of load-shedding, the device can shed load quickly according to the frequency decaying rate, which is good to the stable and secure operation of power system. The hardware system is simple and reliable. The software system has a powerful function and good man-machine interface.

**Key words:** DSP; frequency; frequency decaying rate; under frequency load shedding (UFLS)

(上接第 30页 continued from page 30)

**Abstract:** To ensure the accuracy of power system modeling and reliability of stabilization analysis, it is essential to test the parameters of generator excitation system. An improved genetic algorithm is applied to the parameters identification of the nonlinear generator excitation system. Combining the global optimal search of GA with the local optimal search of BP network based on Gradient method, the parameters evaluation of excitation system can be identified quickly and accurately. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated via experiments by applying it to a generator excitation system. The improved GA has the advantages of fast computation, high precision and better robustness, and has provided a new way for parameters identification of nonlinear generator excitation system.

**Key words:** generator excitation system; nonlinear parameters identification; genetic algorithm; Gradient method