

# 基于改进遗传算法的非线性励磁系统参数辨识

赵书强<sup>1,2</sup>, 王 磊<sup>1,2</sup>, 马燕峰<sup>1,2</sup>, 张昕刚<sup>3</sup>, 周 玮<sup>1,2</sup>

(1. 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, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 电气工程学院, 河北 保定 071003; 3. 华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 将大变异遗传算法应用于非线性发电机励磁系统的参数辨识, 利用其较强的全局寻优能力辨识出发电机励磁系统参数估计值。其原理为: 当某一代中所有个体集中在一起时就以一个远大于通常变异概率的概率执行一次变异操作, 随机、独立地产生许多新的个体, 使种群脱离早熟。比较每代中所有个体的最大适应度与平均适应度的接近程度, 判断当代中所有个体的集中程度; 对当代适应度最高的 2 个个体不进行大变异操作, 以保证具有最大适应度的个体不被破坏掉。采用 Matlab 的 Simulink 模块建立仿真模型, 算例试验结果表明, 基于大变异遗传算法的励磁系统参数辨识方法速度快、精度高。

**关键词:** 非线性励磁系统; 参数辨识; 大变异遗传算法; 全局搜索能力

**中图分类号:** TM 76

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)07-0001-04

## 0 引言

随着电网规模的不断扩大, 发电机组单机容量和电压等级的不断提高, 电力系统已步入大电网、高电压和大机组时代, 因此对系统稳定性也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。发电机励磁系统对电力系统的电压控制<sup>[2]</sup>和稳定控制<sup>[3]</sup>具有十分重要的作用。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描述发电机励磁系统物理过程, 发电机励磁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准确性。在故障情况下, 对系统暂态稳定的影响更大, 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。因此, 对实际励磁系统的数学模型与参数进行正确测定和试验是全网精确建模和安全稳定分析的关键<sup>[4-5]</sup>。

我国电力系统中目前常用的励磁系统参数辨识方法包括频域辨识法<sup>[6-7]</sup>(如快速傅里叶变换 FFT)和时域辨识法<sup>[8]</sup>(如最小二乘法 LSE、线性多项式函数法 PLPF)。最小二乘法是一种现代辨识法<sup>[9]</sup>, 它通过系统的数学模型得到系统的状态空间方程, 结合状态空间方程与最小二乘估计准则实现对系统中待测参数的估计。

对于小扰动情况下线性励磁系统参数的测定可以通过时域辨识法与频域辨识法中相关的算法实

现, 但扰动稍大就会使励磁系统中部分环节进入非线性区, 这种情况下传统的时域辨识法与频域辨识法就无法很好地解决励磁系统参数的辨识问题。遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 具有的学习能力及非线性特性能有效地解决非线性系统的辨识问题, 但基本的遗传算法中存在的早熟收敛问题<sup>[10]</sup>是不可忽视的。现采用基于大变异操作<sup>[11]</sup>的改进遗传算法来克服早熟收敛问题, 并根据此思想对含有限幅环节的励磁系统的参数进行了辨识。

## 1 改进遗传算法的基本原理

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法<sup>[12]</sup>。其本质是一种高效、并行、全局搜索的方法, 它能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识, 并自适应地控制搜索过程以求得最优解。遗传算法操作使用适者生存的原则, 在潜在的解决方案种群中逐次产生一个近似最优方案。在遗传算法的每一代中, 根据个体在问题域中的适应度值和从自然遗传学中借鉴来的再造方法进行个体选择, 产生一个新的近似解。这个过程导致种群中个体的进化, 得到的新个体比原个体更能适应环境。

基本遗传算法求解优化问题<sup>[13]</sup>的一般步骤如下:

- 确定遗传算法的参数, 即种群规模、交叉概率和变异概率;
- 确定适应度函数;
- 随机产生初始种群, 计算每个个体的适应度;
- 应用遗传算法中的选择、交叉和变异算子对

当代个体进行繁殖,产生子代;

e. 满足终止条件(如给定世代数),结束并输出最优解,否则转到步骤 d。

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,以较大概率收敛到全局次优点<sup>[14]</sup>。但由于遗传算法处理的群体是有限的,因而存在随机误差,有可能导致未成熟收敛现象,即群体中个体的多样性过早地丢失,从而使算法陷入局部最优点。在基于遗传算法的基础上对种群变异进行一定调节,增加群体中个体的多样性,从而可以更好地寻找全局最优解。

理论上,基本遗传算法的变异操作可以使算法跳出早熟。但是为了保证算法的稳定性,变异操作的变异概率通常取值很小,所以算法一旦出现早熟,单靠传统的变异操作需要很多代才能变异出一个不同于其他个体的新个体,这在很大程度上影响了遗传算法的收敛速度。

大变异操作的思路是:当某一代中所有个体集中在一起时就以一个远大于通常的变异概率的概率执行一次变异操作,具有大变异概率的变异操作能够随机、独立地产生许多新的个体,从而使整个种群脱离早熟。

大变异操作在实现时有 2 个需要解决的问题。

a. 判断某代中所有个体的集中程度。采用比较每代中所有个体的最大适应度  $f_{\max}$  与平均适应度  $f_{\text{ave}}$  的接近程度的方法进行判断。因为通常某代的最大适应度  $f_{\max}$  与  $f_{\text{ave}}$  越接近,该代中的个体就越集中。

b. 保证父代具有最大适应度的个体不被大变异操作破坏掉。采用在当代所有适应度最高的个体中选出 2 个,对这 2 个个体不进行大变异操作的方法以保证具有最大适应度的个体不被破坏掉。

## 2 基于改进遗传算法的励磁系统参数辨识

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参数,使该数学模型最大程度地接近真实系统。其基本过程是:通过系统仿真求出与实际系统在相同激励信号作用下的模型输出  $\hat{y}$ ,然后比较模型输出  $\hat{y}$  与实际系统输出  $y$  的差异,构成误差函数,利用误差函数不断修正数学模型的未知参数。当误差函数取极小值时就认为此时辨识出的参数是待辨识系统的参数。

发电机励磁系统参数的辨识问题实际上也就是求解数学模型中的未知参数使得误差函数达到极小值的问题。利用遗传算法的空间快速并行搜索能力,就可以在众多的可行解集合中找到问题的最优解<sup>[15]</sup>。但直接应用遗传算法辨识励磁系统参数容易导致未成熟收敛现象<sup>[16]</sup>,使得算法陷入局部最优解。而大变异遗传算法则在种群个体变异环节大大提高了变异概率,从而使得个体的多样性得到提高,抑制了早熟收敛现象<sup>[17]</sup>。

大变异操作由集中和分散 2 个子操作组成。当一代中的最大适应度  $f_{\max}$  与平均适应度  $f_{\text{ave}}$  满足式(1),则将该代中所有个体设为具有最大适应度个体的形式,这就是集中。

$$\alpha f_{\max} < f_{\text{ave}} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为密集因子,表示个体的集中程度。

随后,以一个比平常变异概率大 4 倍以上的概率  $P_{\text{big}}$  对集中了的个体进行一次大变异操作,这就是分散。

大变异遗传算法用于非线性发电机励磁系统参数辨识有 6 个基本步骤。

a. 初始化遗传算法控制参数。如种群规模  $N$ ,交叉概率  $P_c$ ,变异概率  $P_m$ ,大变异概率  $P_{\text{big}}$  和密集因子  $\alpha$ 。

b. 种群初始化。随机产生初始种群  $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

c. 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。

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

适应度函数取为

$$f = C_{\max} - E \quad (3)$$

式中  $C_{\max}$  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。

d. 遗传算子。采用比例选择算子单点交叉算子和基本位变异算子。按照上述的选择算子和交叉算子进行操作,判断是否满足  $\alpha f_{\max} < f_{\text{ave}}$ 。若满足则进行如下操作,否则转 e。使  $c_1, c_2$  分别代替  $a_{\max}, a_{\max-1}$ ,其中  $a_{\max}, a_{\max-1}$  分别为种群中适应度最大的个体和适应度次最大的个体。用变异算子对剩余个体按大变异概率进行变异操作,转步骤 f。

e. 对交叉后的个体按变异概率  $P_m$ ,用变异算子进行变异操作。

f. 对生成的新群体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。

由于该算法每次搜索结果存在误差,对同一个待辨识参数应进行数次辨识,取数次辨识结果的平均值获得更为准确的辨识结果。

## 3 辨识结果

某励磁系统框图如图 1 所示。

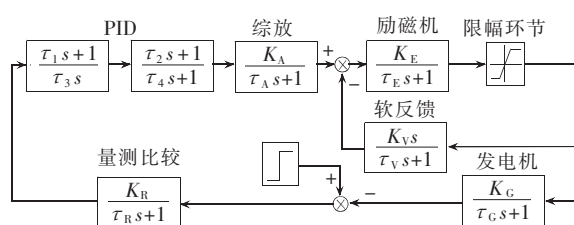


图 1 发电机励磁系统传递函数框图

Fig.1 Transfer function of generator excitation system

在信号输入端加一个阶跃扰动信号,采集励磁机输出数据。由于在实际中采集到的数据常常含有噪声,为了验证改进大变异遗传算法辨识的效果,在将采集到的数据代入算法前加入信噪比为 20 的白噪声。利用上述数据,采用大变异遗传算法实现发电机励磁系统参数辨识。

仿真模型采用 Matlab 的 Simulink 模块建立,设置全局变量。模型中的扰动信号从实际的阶跃信号读入,系统在扰动作用下的响应通过运行 Simulink 模块实现,进化代数为 20 代。进行数次辨识取其平

均值得到各个环节参数如表 1 所示。

将辨识参数代入仿真模型中进行仿真,将真实参数情况下系统的输出与辨识参数情况下的输出比较,如图 2 所示(图中实线为真值,虚线为模拟值; $n$ 为采样点数)。

由图 2 中系统输出比较可见,经过 30 代进化后辨识系统输出与实际系统输出一致,相同扰动信号下 2 个系统响应近似表明辨识得到的系统可以表征实际物理系统,因此辨识得到的系统是准确的,可以用来分析系统稳定性。

表 1 基于改进遗传算法的辨识结果  
Tab.1 Results of parameter identification based on improved genetic algorithm

| 参数   | $K_G$      | $\tau_G/s$ | $K_E$      | $\tau_E/s$ | $K_A$      | $\tau_A/s$ | $K_V$      |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 参数真值 | 1.0000     | 1.5000     | 1.0000     | 0.4000     | 1.0000     | 0.0300     | 0.1000     |
| 辨识结果 | 0.9953     | 1.5002     | 1.0195     | 0.4329     | 0.9994     | 0.0200     | 0.0773     |
| 参数   | $\tau_V/s$ | $\tau_1/s$ | $\tau_2/s$ | $\tau_3/s$ | $\tau_4/s$ | $K_R$      | $\tau_R/s$ |
| 参数真值 | 0.2000     | 0.7000     | 0.0800     | 1.5000     | 3.0000     | 0.5000     | 0.0500     |
| 辨识结果 | 0.1478     | 0.7480     | 0.0894     | 1.5127     | 3.0187     | 0.5196     | 0.0566     |

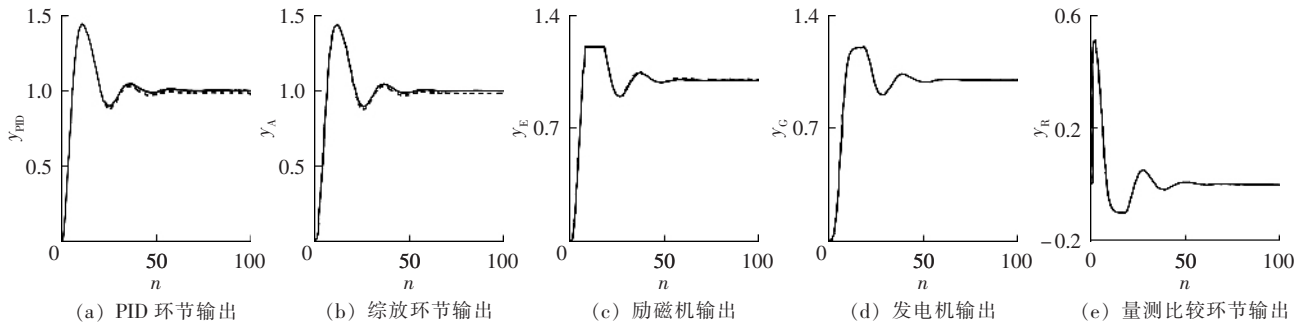


图 2 实际系统输出与辨识系统输出比较  
Fig.2 Comparison between real system output and identification system output

4 结论

提出采用大变异操作的改进遗传算法应用于非线性发电机励磁系统的参数辨识。基于大变异操作的改进遗传算法提高了遗传算法的全局搜索能力,进一步加快了遗传算法的收敛速度,增强了遗传算法的辨识效果,可以有效解决复杂非线性系统的参数辨识问题,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方法。

参考文献:

[1] 吴涛,苏为民,刘永奇,等. 华北电网开展发电机励磁系统参数辨识工作综述[J]. 华北电力技术,2003(9):24-26.  
WU Tao,SU Wei - min,LIU Yong - qi,et al. Review on developing generator exciting system parameter recognition in North China power network[J]. North China Electric Power,2003(9):24-26.

[2] 刘增煌. 同步发电机励磁控制的任务及其设计思想比较[J]. 电网技术,1999,23(8):6-9,16.  
LIU Zeng - huang. Task of generator excitation control and design idea comparison[J]. Power System Technology,1999,23(8):6-9,16.

[3] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计与应用[M]. 北京:中国电

力出版社,2002.

[4] 刘倩,戴列峰,蒋平,等. 发电机励磁系统参数辨识原理及方法[J]. 江苏电机工程,2001,20(1):24-27.  
LIU Qian,DAI Lie - feng,JIANG Ping,et al. The theory and method for parameter identification of excitation system[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2001,20(1):24-27.

[5] 沈善德,朱守真,焦连伟,等. 电力系统辨识建模和暂态稳定校核分析[J]. 电力系统自动化,1999,23(19):43-47.  
SHEN Shan - de,ZHU Shou - zhen,JIAO Lian - wei,et al. The parameter identification of power system and its application for transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(19):43-47.

[6] 蒋平,戴列峰,黄霆,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(16):30-33.  
JIANG Ping,DAI Lie - feng,HUANG Ting,et al. Application of frequency domain method in parameter identification for excitation systems of generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(16):30-33.

[7] 朱守真,沈善德,韩波. 频域法辨识同步机参数[J]. 清华大学学报:自然科学版,1995,35(1):107-114.  
ZHU Shou - zhen,SHEN Shan - de,HAN Bo. Identification of parameters of synchronous machine by frequency response tests[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1995,35(1):107-114.

[8] 王良,沈善德,朱守真,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):25-28,37.  
WANG Liang,SHEN Shan - de,ZHU Shou - zhen,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, 37.
- [9] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.
- [10] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005.
- [11] 李凡, 徐章艳. 遗传算法种群多样性的度量[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(7): 3-5.  
LI Fan, XU Zhang-yan. Measurement of population diversity in genetic algorithms[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(7): 3-5.
- [12] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [13] 丁富春, 张明龙, 李晋, 等. 基于改进遗传算法的非线性发电机励磁系统参数辨识[J]. 继电器, 2005, 33(9): 30-33, 72.  
DING Fu-chun, ZHANG Ming-long, LI Jin, et al. Parameters identification of nonlinear generator excitation system based on an improved genetic algorithm[J]. Relay, 2005, 33(9): 30-33, 72.
- [14] 文劲宇, 刘沛, 程时杰. 遗传算法及其在电力系统中的应用(上)(下)[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(10): 59-62; 1996, 20(11): 62-67.  
WEN Jin-yu, LIU Pei, CHENG Shi-jie. Genetic algorithm and its applications to power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(10): 59-62; 1996, 20(11): 62-67.
- [15] 黄开胜, 童怀, 郑泰胜. 遗传算法在异步电动机动态模型参数识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 38-42, 56.  
HUANG Kai-sheng, TONG Huai, ZHENG Tai-sheng. Parameter estimation for an induction motor's dynamic model using genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 38-42, 56.
- [16] 周济, 罗应立, 崔翔. 一种改进的遗传算法及其在同步电机辨识中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 16-19.  
ZHOU Ji, LUO Ying-li, CUI Xiang. An improve genetic algorithm and its application in synchronous machine identification[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 16-19.
- [17] 吕佳. 大变异遗传算法在非线形系统参数估计中的应用[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2004, 21(4): 17-20.  
LÜ Jia. Application in parameter estimation of nonlinear system based upon improved genetic algorithms of cataclysmic mutation[J]. Journal of Chongqing Teachers College: Natural Science Edition, 2004, 21(4): 17-20.
- [18] ZWE - LEE G. A particle swarm optimization approach for optimum design for PID controller in AVR system[J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2004, 19(2): 384-391.
- [19] BHASKAR R, CROW M L, LUDWIG E, et al. Nonlinear parameter estimation of excitation systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1225-1231.
- [20] 杨琳, 贺仁睦, 马进, 等. 基于实测的自并励励磁系统参数辨识[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 32-34.  
YANG Lin, HE Ren-mu, MA Jin, et al. Identification of bus fed static excitation system parameters based on measured data[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(6): 32-34.

(责任编辑: 李育燕)

#### 作者简介:

赵书强(1964-), 男, 河北景县人, 教授, 研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail: zsqdl@163.com);

王磊(1982-), 男, 河北定州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定运行与控制;

马燕峰(1978-), 女, 河北迁西人, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制;

张昕刚(1973-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向为控制理论与控制工程;

周玮(1980-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定运行与控制。

### Parameter identification of nonlinear excitation system based on improved genetic algorithm

ZHAO Shu-qiang<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, MA Yan-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-gang<sup>3</sup>, ZHOU Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. School of Control Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Because of its strong global searching ability, the improved genetic algorithm based on big mutation is applied to the parameter identification of nonlinear generator excitation systems. When all units of one generation focus together, a mutation operation is carried out with a mutation probability much bigger than usual. Many new units are thus generated randomly and independently, making the group deviate from earliness. The difference between the maximum fitness function of all units in one generation and the average fitness function is used to judge the concentration degree of all units in one generation. The two units which have the maximum fitness function should not be operated by the big mutation operation to keep these two units undestroyed. The simulation model is set up using Simulink of Matlab. The fast speed and high precision of the proposed approach is demonstrated by experiment.

**Key words:** nonlinear excitation system; parameter identification; genetic algorithm based on big mutation; global searching ability