

# 基于改进混合遗传算法的同步电机参数辨识

倪良华, 李先允

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 针对同步电机参数辨识问题, 建立了精确表示非同步采样及高次谐波在内的极值优化模型, 利用改进混合遗传算法对该模型进行求解, 为提高同步电机瞬态和超瞬态参数的精确辨识打下了良好基础。针对普通遗传算法收敛慢和经典迭代法初始点敏感问题, 该改进混合遗传算法结合了全局寻优的遗传算法和局部寻优的模式搜索方法, 不需要计算矩阵导数, 可实现无需指定初值的电机参数快速求解。理论和仿真实验表明, 该方法所需数据窗小, 能有效提高参数测量的运行效率和计算精度。

**关键词:** 参数辨识; 同步电机; 混合遗传算法; 模式搜索

## Parameter identification of synchronous machine based on a hybrid genetic algorithm

NI Liang-hua, LI Xian-yun

(Power Engineering Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** A parameter extremum optimization model of synchronous machine is developed, in which such error factors as nonsynchronous sampling and harmonics are precisely depicted. In order to realize accurate identification of transient and subtransient parameters, a new measuring method based on hybrid genetic algorithm is improved and then applied into solve this extremum optimization model. In view of that the ordinary genetic algorithm converges slowly and the classic method is sensitive to initial guess, the improved hybrid genetic algorithm combines the global optimization of genetic algorithm and the strongly local search of pattern search method, consequently, do not need to calculate matrix derivative and quickly to solve problem without specifying the initial value of the parameters. Theory and simulation experiments show that the method requires a short data window and can effectively improve the measurement of the efficiency and accuracy.

**Key words:** parameter identification; synchronous machine; hybrid genetic algorithm; pattern search

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0051-05

## 0 引言

同步发电机是电力系统的重要设备, 准确的同步电机参数对研究和分析电力系统运行、控制系统设计等问题有着重要的意义。其中, 反映同步电机暂态过程的瞬态参数与电力系统的稳定性、继电保护设备和其它电器的选择及使用有着密切的关系<sup>[1-3]</sup>。

在工程实际应用中, 传统对瞬态参数的求解一般是通过突然短路电流曲线的包络线加减来得到短路电流的周期分量和非周期分量, 这种数据处理方法精度不高, 严重影响计算的准确度和可信度<sup>[4]</sup>。鉴于此, 不少改进措施被提出: 文献[4]提出了基于

扩展 Prony 算法的超瞬态参数计算方法, 提高了辨识精度。但算法在实际应用中存在阶数确定的难题, 而且辨识结果对噪声比较敏感; 文献[5]提出了基于 HHT 的辨识方法, 可以在强噪声背景下准确地提取出短路电流数据中的基波分量和直流分量, 很大程度上消除了噪声影响, 但 HHT 的 EMD 信号分析方法目前存在难以解决的“端点效应”问题<sup>[6-7]</sup>。

本文将遗传算法与经典搜索方法结合起来, 构成的改进混合遗传算法融合了具有强局部搜索能力的模式搜索方法, 极大地改善了遗传算法的性能。将该算法应用到同步电机参数辨识中, 克服了传统方法精度低的缺点, 不仅避免了混合遗传算法中矩阵导数的计算, 而且所需数据窗短, 对搜索初值不敏感。

基金项目: 南京工程学院院级科研基金项目 (KXJ08107)

### 1 同步电机极值优化模型

空载情况下同步电机发生突然三相短路后, a相中的定子电流可表示为<sup>[8]</sup>:

$$i_a = E \left[ \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_d} \right] \cos(2\pi ft + \theta_0) - \frac{E}{2} \left( \frac{1}{x_d'} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \theta_0 - \frac{E}{2} \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(4\pi ft + \theta_0) + e(t) \quad (1)$$

式(1)中为了考虑短路试验时的实际情况, 假定电流由两部分组成: 前一部分为电流的非周期分量、基波分量和二次谐波分量, 完全由给定的电机参数决定, 可以将其称为短路电流的实际值或准确值; 后一部分 $e(t)$ 为噪声电流, 主要由饱和、涡流、磁滞和环境噪声所引起的高次谐波电流组成<sup>[5]</sup>, 因此可假设 $e(t)$ 表达式为:

$$e(t) = \sum_{k=3}^n A_k \sin(2\pi f_k t + \theta_0) \quad (2)$$

式(1)中, 发电机参数包括 $x_d', x_d'', x_q'', T_a, T_d', T_d''$ 。同步电抗 $x_d$ 一般随运行情况发生变化, 但突然短路过渡过程作为一个测试同步电机瞬态和超瞬态参数的一个标准过程, 可以假设 $x_d$ 不变。由此可见, 式(1)是由除 $x_d$ 之外的六个参数的共同函数, 将其简记为:

$$i_a = i(x_d', x_d'', x_q'', T_a, T_d', T_d'') \quad (3)$$

式(1)中, 记 $T_s$ 为信号采样时间间隔,  $f = 1/T_s$ 为采样频率, 每周期采样 $N$ 点。若信号基频分量的实际周期 $T$ 不等于 $T_s$ 的整数倍, 将产生非同步采样误差。引入采样非同步步度 $\lambda = NT_s/T = Nf/f_s$ , 量纲为1, 将 $\lambda$ 代入式(1)并令 $t = nT_s$ , 并考虑到式(2), 则式(1)也是 $\lambda$ 与 $A_k$ 的函数, 设第 $n$ 时刻的电流采样值为 $i_n$ , 则:

$$i_n = i_a = i(x_d', \dots, T_d'', \lambda, A_3, \dots, A_n) \quad (4)$$

将式(4)简记为:

$$F_n(X) = i_n - i(x_d', \dots, T_d'', \lambda, A_3, \dots, A_n) = 0 \quad (5)$$

式中: 假设 $X$ 为 $1 \times l$ 的向量, 则给出 $l$ 个数据采样点, 就可以得到 $l$ 个相互独立的方程, 从而可以求解出待辨识的电机参数。为了方便求解, 将式(5)转化为一个等价的极值优化问题如式(6)所示。

$$\begin{cases} \text{find } X = (x_d', \dots, A_n) \ X \in \Phi \\ \min : F(X) = \sqrt{\sum_{n=1}^l F_n(X)} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Phi$ 为方程组的解区间, 当 $F(X)$ 最小为0时, 对应的 $X$ 即为方程组的解。

### 2 改进的混合遗传算法设计

#### 2.1 混合遗传算法设计

##### (1) 编码方式及初始种群选取

采用实数编码方式, 个体的长度等于待求变量的个数, 个体基因初始值等于解区间范围内一个随机值。

##### (2) 适应度函数选取

从式(6)知,  $F(X)$ 值越小,  $X$ 越逼近方程组的解, 因此本文选择将目标函数选为适应度函数:

$$F_{\text{fitness}} = F(X) = \sqrt{\sum_{n=1}^l F_n(X)} \quad (7)$$

##### (3) 选择操作

采用随机联赛选择方法<sup>[9]</sup>。这是一种基于个体适应度之间大小关系的选择方法, 其基本思想是每次随机选取 $W$ 个个体进行比较, 将其中最好的一个复制到下一代群体中, 并重复进行 $M$ 次( $M$ 为群体规模)。本文选取适应度值最小的个体形成新的种群。

##### (4) 交叉操作

随机选择2个位置, 以交叉概率 $P_c$ 进行式(8)中均匀算数交叉, 并重复 $M$ 次( $M$ 为群体规模)。

$$\begin{cases} X_1' = X_1 + (1-a)X_2 \\ X_2' = X_2 + (1-a)X_1 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:  $a$ 是一个0~1之间的随机数。

##### (5) 变异操作

本文采用文献[10]中的非均匀变异方法。设变量 $x_i$ 解的范围为 $[a_i, b_i]$ , 以变异概率 $P_m$ 进行以下变异操作:

$$\begin{cases} x_i' = x_i + (b_i - x_i)(1 - a)^{\frac{1-t}{T}} \ \beta > 0.5 \\ x_i' = x_i - (x_i - a_i)(1 - a)^{\frac{1-t}{T}} \ \beta \leq 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $a, \beta$ 为0~1之间的随机数,  $t$ 为进化代数,  $T$ 为最大进化代数。

##### (6) 混合操作

选择合适的混合算子对算法的成功很关键。为改善遗传算法运行效率, 提高计算精度, 在每一代

选择、交叉、变异操作后, 以概率  $P_h$  嵌入改进模式搜索方法。

模式搜索方法是求解无约束最优化问题的直接方法, 该方法仅用到目标函数的函数值, 而不必要计算导数值, 也不需要一维搜索技巧。但由于式 (6) 是一个含约束最优化问题, 因此本文对文献 [11] 中模式搜索算法改进如下:

1) 取初始点  $X^{(1)}$ , 初始步长  $\alpha > 0$ , 置精度要求  $\varepsilon$  及最大搜索次数  $N$ , 置  $t_1 = X^{(1)}$ ,  $k=1$ 。

2) 对于  $i = 1, 2, \dots, n$ , 做: 如果  $t_i + \alpha e_i \in [a_i, b_i]$  并且  $f(t_i + \alpha e_i) < f(t_i)$ , 则置  $t_{i+1} = t_i + \alpha e_i$ ; 如果  $t_i - \alpha e_i \in [a_i, b_i]$  并且  $f(t_i - \alpha e_i) < f(t_i)$ , 则置  $t_{i+1} = t_i - \alpha e_i$ ; 否则置  $t_{i+1} = t_i$ 。

3) 若  $f(t_{n+1}) < f(X^{(k)})$ , 则置

$$X^{(k+1)} = t_{n+1}$$

$$t_1 = X^{(k+1)} + (X^{(k+1)} - X^{(k)})$$

置  $k = k + 1$ , 如果  $k \leq N$  转 2), 否则停止计算。

4) 若  $t_1 \neq X^{(k)}$ , 则置  $t_1 = X^{(k)}$ , 转 2)。

5) 若  $\alpha < \varepsilon$ , 则停止计算; 否则置  $\alpha = \alpha / 2$ , 转 2)。

## 2.2 混合遗传算法流程

混合遗传算法流程如图 1 所示。图 1 中各框的功能如下:

1) 框①, 算法初始化, 确定最大进化代数  $T$ 、变异概率  $P_m$ 、交叉概率  $P_c$ 、种群规模  $M$ 、每代淘汰数目  $E$ 、个体大小  $L$ 、联赛规模  $W$ 、混合运算概率  $P_h$ 、终止精度要求  $\delta$ 、个体解区间  $\phi$ , 加载同步电机短路电流数据  $D$  (包括采样频率  $f_s$ ), 产生初

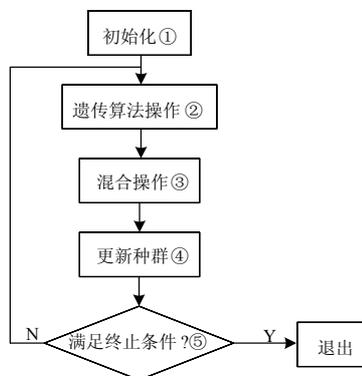


图 1 混合遗传算法流程图

Fig.1 Flow chart of hybrid genetic algorithm

始种群  $P$ , 并计算种群  $P$  中个体的适应度  $F_{it}$  (计算适应度时, 本文均匀选择  $D$  中  $L$  个数据点, 经大量测试该选择方式有利于加速收敛)。

2) 框②, 对种群  $P$  进行遗传算法的选择、交叉、变异操作, 产生种群  $P'$ , 并计算种群  $P'$  中个体的适应度  $F_{it}'$ 。

3) 框③, 以概率  $P_h$  更新种群  $P'$ , 并更新对应的适应度  $F_{it}'$ 。

4) 框④, 找出种群  $P'$  中最好的  $E$  个个体, 并用它们替换种群  $P$  中最差的  $E$  个个体。

5) 框⑤, 比较种群  $P$  中最好个体的适应值  $B_{estFit}$  是否小于终止精度要求  $\delta$  或者已经到达最大进化代数  $T$ , 如果是则终止。

## 2.3 改进混合遗传算法

较之单纯的遗传算法, 上述混合算法能明显改善效率, 但进一步观察可以发现, 这一性能还可改进。对改进模式搜索优化算法, 给定初始点后, 算法将逐步向初始点附近的一个最优点收敛, 在绝大多数情况下, 结果是一个局部最优点。但事实上这些局部最优点的准确位置并不需要, 因为本文关心的是全局最优点。理想的算法是在到达全局最优点的收敛域之后, 再使用改进模式搜索, 获得全局最优点的准确位置。也就是说, 上述混合算法中的改进模式搜索操作, 在到达全局最优点收敛域之前, 没有必要彻底进行。

注意到这一特点, 就应该在混合运算过程中改变混合运算概率  $P_h$ , 只是当算法接近全局最优时, 才大量使用改进模式搜索操作。  $P_h$  具体的控制方式如式 (10) 所示。

$$P_h = \begin{cases} P_{\min} + \frac{\delta}{B_{estFit}} & P_h < P_{\max} \\ P_{\max} & P_h \geq P_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{\min}$  不应该太小, 本文取 0.1;  $P_{\max}$  不应该取太大, 由于种群规模  $M$  较大, 大量的改进模式搜索操作将耗费大量时间, 文中取 0.2。

通过上述方面的改进, 大大减少了混合算法的计算量, 同时保留了混合算法较好的收敛特性。经过实验证实了它的效果。

## 3 算例分析

为验证本文方法的有效性, 本文初始化遗传算法参数值如下:  $T=20$ ,  $P_m=0.02$ ,  $P_c=0.7$ ,  $M=300$ ,

$E=5, W=8, \delta=1.0e-005$ 。

初始化模式搜索算法参数值如下： $\varepsilon=1.0e-6, \alpha=0.5, N=200$ 。

### 3.1 不含噪声的短路电流分析

取短路初始相角  $\theta_0 = \pi/6$ ， $f_s=1000$ （每周周期采样 20 点，实际基波频率  $f=50.25$  Hz）， $E=1$ 。按表 1 中参数预设值仿真电机发生三相短路后的电流波形（不包括噪声分量）如图 2 所示。

采用改进的混合遗传算法进行 10 次实验（成功 9 次，其中在最大进化代数  $T=20$  内，最好个体适应值小于  $\delta=1.0e-005$  的就认为实验成功），其运算结果如表 1 所示。

从表 1 及遗传算法相关参数中可以看出，由于以概率  $P_h$  加入了混合操作，在选择、交叉、变异等操作对解空间进行全局搜索的同时，一旦有某个个体进入模式搜索方法的收敛区域，即可以很高概率

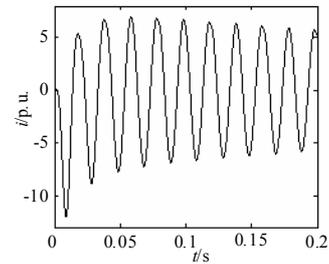


图 2 短路电流波形

Fig.2 Waveforms of short-circuit currents

快速收敛到满足精度的解（平均值最大误差为  $x'_d$ ，但小于 0.0172%）。

在改进混合遗传算法的计算过程中，模式搜索算法的精度要求  $\varepsilon$  是用来控制参数辨识精度的，辨识参数结果的极限精度便是  $\varepsilon$ ；遗传算法终止精度要求  $\delta$  主要是来控制算法效率的， $\delta$  越小算法计算时间越长。两者配合使用，一般  $\delta$  可以取  $0.1 \sim 1\varepsilon$ 。

表 1 算例 1 仿真参数及计算结果

Tab.1 Simulation parameters and result of example one

	Min ( $F_{fitness}$ )	$T_d''/s$		$x_d''$		$x_d'$		$x_q''$		$T_d'/s$		$T_a/s$		$\lambda$		
		值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	值	误差 /(%)	
		实验情况	最好	8.243e-7	0.68	-0.0	0.12	0.0	0.83	0.5	0.55	0.0	0.31	-0.1	0.01	0.0
	最差	1.3616e-5	0.68	-0.3	0.12	0.0	0.86	3.4	0.55	0.0	0.30	-1.1	0.01	0.0	1.00	0.002
	平均	4.4944e-6	0.68	0.0	0.12	0.0	0.83	0.0	0.55	0.0	0.31	0.0	0.01	0.0	1.00	9.950
预设值	0	0.682 3		0.125 4		0.835 4		0.554		0.312		0.017 2		1.005		
搜索区间	×	[0 1]		[0 1]		[0 1]		[0 1]		[0 1]		[0 0.1]		[0.9 1.1]		

表 2 算例 2 仿真参数及计算结果

Tab.2 Simulation parameters and result of example two

	Min( $F_{fitness}$ )	$T_d''/s$	$x_d''$	$x_d'$	$x_q''$	$T_d'/s$	$T_a/s$	$\lambda$	$A_3$	$A_5$	$A_7$	$A_8$
平均值	6.52e-4	0.680 02	0.125 43	0.846 7	0.553 93	0.307 9	0.017 195	1.005 06	0.099 84	0.100 01	0.100 01	0.1
误差/(%)	×	-0.334 2	0.023 9	1.352 6	-0.012 6	-1.314 1	-0.029 1	0.006	-0.160 0	0.01	0.01	0
预设值	0	0.682 3	0.125 4	0.835 4	0.554	0.312	0.017 2	1.005	0.1	0.1	0.1	0.1
搜索区间	×	[0 1]	[0 1]	[0 1]	[0 1]	[0 1]	[0 0.1]	[0.9 1.1]	[0 0.5]	[0 0.5]	[0 0.5]	[0 0.5]

注：表 1 与表 2 中误差指仿真值的计算误差。

### 3.2 含噪声的短路电流分析

在图 2 短路电流基础上迭加一噪声，假设该噪声是由幅值为 0.1 的 3、5、7、8 高次谐波构成，则噪声电流分量波形如图 3 所示。

采用改进的混合遗传算法进行 10 次实验（成功 5 次），其运算结果如表 2 所示。由于个体规模较大，且最大进化代数较小，表 2 中结果误差较表 1 大，而且大概有 0.5 的概率不收敛。为了增加收敛概率，应该适当增加混合运算的次数（如增加式(10)

中的  $P_{\min}$  )、增大最大进化代数、减小遗传算法终止精度要求  $\delta$ 、增大种群等方式。

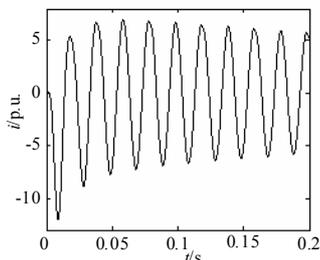


图3 噪声电流分量波形

Fig.3 Waveforms of noise currents

#### 4 结论

本文将遗传算法及模式搜索算法结合起来, 形成混合遗传算法, 然后去掉了冗余的混合操作, 从而改进了其计算效率, 并将其应用于同步电机参数辨识, 针对误差因素形成相关数学优化模型, 获得了精确结果, 对研究和分析电力系统运行、控制系统设计等问题有着重要的意义。

理论分析和大量实验均表明该改进混合遗传算法具有以下特点:

继承了遗传算法对计算初始点不敏感优点, 拥有模式搜索方法不需要一维搜索技巧及计算矩阵导数特点, 计算所需数据窗短, 进化代数少 (一般在均在 20 代内可以得到较精确结果), 算法的收敛性好、计算精度好, 为提高辨识准确度打下了良好的基础。

#### 参考文献

- [1] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [2] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [3] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (1): 136-141.  
SUN Yu-guang, WANG Xiang-heng, GUI Lin, et al. Transient Calculation of Stator's Internal Faults in Synchronous Generator Using Fem Coupled with Multi-lop Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (1): 136-141 (in Chinese).
- [4] 李天云, 高磊, 陈晓东, 等. 基于 HHT 的同步电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (8): 153-158.

- LI Tian-yun, GAO Lei, CHEN Xiao-dong, et al. Parameter Identification of Synchronous Machine Based on Hilbert-Huang Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (8): 153-158(in Chinese).
- [5] 吴旭升, 马伟明, 王公宝, 等. 基于小波变换和 prony 算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 38-42.  
WU Xu-sheng, MA Wei-ming, WANG Gong-bao, et al. Parameter Identification of Synchronous Machine based on Wavelet Transform and Prony Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (19): 38-42(in Chinese).
- [6] 邓拥军, 王伟, 钱成春. 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. Comments and Modifications on EMD Method[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46 (3): 257-263.
- [7] 纪跃波, 秦树人, 柏林, 等. 有限区间信号边界效应问题的研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21 (4): 108-112.  
JI Yue-bo, QIN Shu-ren, BAI Lin, et al. Research on the Edge Effect of Cutoff Signal with Limited Time Domain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21 (4): 108-112.
- [8] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [9] 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.
- [10] 李媛, 刘涤尘, 杜新伟, 等. 混合遗传算法在电力参数测量中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (12): 86-91.  
LI Yuan, LIU Di-chen, DU Xin-wei, et al. Application of Hybrid Genetic Algorithm in Power System Parameter Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (12): 86-91(in Chinese).
- [11] 薛毅. 最优化原理与方法[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.

收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2009-02-27

作者简介:

倪良华 (1966-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统故障诊断, 电力系统仿真; E-mail: nilianghua\_nj@163.com

李先允 (1964-), 男, 教授, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力电子技术在电力系统中的应用、分布式发电等。