

# 基于 LabWindows/CVI 的同步发电机三相突然短路的参数辨识

王红星<sup>1</sup>, 张恒伟<sup>1</sup>, 刘 惺<sup>2</sup>

(1.连云港供电公司, 江苏 连云港 222004; 2.西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 针对同步电机的特殊试验—三相突然短路试验, 建立了相应的数学模型。结合各参数自身的特点, 推导出一种更适合于参数计算的数学模型, 在该模型的基础上利用 LM(Levenberg-Marquardt)算法实现了瞬态参数的求解。在所得模型基础上给出了仿真实例和实际数据处理结果, 证明了该数学模型和算法的可行性, 以及与传统处理方法相比的优越性。

**关键词:** LabWindows/CVI; 三相突然短路; LM 算法; 参数辨识

## 0 引言

同步发电机的瞬态参数是研究电力系统稳定分析的重要组成部分, 与继电保护装置的设计、励磁系统的设计、电网故障的计算都有密切的关系。在工程应用中, 一般通过对三相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, 从而求解瞬态参数, 这种处理方法不仅处理过程复杂, 且误差较大, 影响电机参数的准确性。

本文推导出一种更适合于参数计算的数学模型, 通过 LabWindows/CVI 开发平台, 对试验数据进行降噪处理, 分离出短路电流的周期分量和非周期分量, 进而引用系统辨识中的 LM 算法求解出电机的瞬态参数。在所得模型基础上给出了仿真实例和实际数据处理结果, 证明了该数学模型和算法的可行性, 以及与传统处理方法相比有无可比拟的优越性。

## 1 三相突然短路数学模型的分解及改进模型的建立

由电机学可知, 同步发电机在空载运行情况下三相突然短路时, 相电流的表达式(忽略二次谐波分量电流)为:

$$i_a = \sqrt{2} \left[ \frac{U_\phi}{x_d} + \left( \frac{U_\phi}{x_d'} - \frac{U_\phi}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{U_\phi}{x_d''} - \frac{U_\phi}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] U_\phi \cos(t + \alpha_0) - \sqrt{2} \frac{U_\phi}{x_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos \alpha_0$$

(1)

式中,  $U_\phi$  为相电压;

$I_{k(\infty)} = \frac{U_\phi}{X_d}$  为稳态短路电流的有效值;

$\Delta I_{k(0)}' = \frac{U_\phi}{X_d'} - \frac{U_\phi}{X_d}$  为瞬变分量电流的初始有效值;

$\Delta I_{k(0)}'' = \frac{U_\phi}{X_d''} - \frac{U_\phi}{X_d'}$  为超瞬变分量电流的初始有效值;

$I_{a1} = \frac{\sqrt{2}U_\phi}{X_d} \cos \alpha_0$  为非周期分量电流的初始值;

$T_d'$ 、 $T_d''$ 、 $T_a$  分别为三相突然短路时瞬变分量、超瞬变分量及非周期分量电流衰减的时间常数。

首先将式(1)规范化得:

$$i_a = (a_0 + a_1 e^{-a_2 t} + a_3 e^{-a_4 t}) \cos(t + \alpha_0) - a_5 e^{-a_6 t} \cos \alpha_0$$

(2)

式中  $a_0 = \sqrt{2} \frac{U_\phi}{x_d}$ ,  $a_1 = \sqrt{2} \left( \frac{U_\phi}{x_d'} - \frac{U_\phi}{x_d} \right)$ ,

$a_2 = -\frac{1}{T_d'}$ ,  $a_3 = \sqrt{2} \left( \frac{U_\phi}{x_d''} - \frac{U_\phi}{x_d'} \right)$ ,  $a_4 = -\frac{1}{T_d''}$ ,

$a_5 = \sqrt{2} \frac{U_\phi}{x_d}$ ,  $a_6 = -\frac{1}{T_a}$ 。

由于三相突然短路试验开始时的合闸角  $\alpha_0$  无法确定, 对于瞬态参数的求解和辨识造成了很大的麻烦, 为了避免合闸角  $\alpha_0$  的影响, 我们只利用电流曲线上的波峰数据进行参数求解, 进一步将式 (2) 优化得

$$i_a = a_0 + a_1 e^{-a_2 t} + a_3 e^{-a_4 t} - a_5 e^{-a_6 t} \quad (3)$$

根据实际应用可以得到如下的适应参数求解的改进模型为:

(1) 在  $t = [0.3, 2.0]$ s 区间内, 由于超瞬变分量已经衰减接近于零。通过稳态电流、瞬态分量、和非周期分量组合的数学模型 (4) 式

$$i_s + i' + i_{dc} = a_0 + a_1 e^{-a_2 t} - a_5 e^{-a_6 t} \quad (4)$$

求解出发电机的稳态参数、瞬态参数、和非周期分量衰减时间参数。

(2) 在  $t = [0.0, 0.3]$ s 区间内, 从短路电流中减去计算出来的稳态电流、瞬态分量、和非周期分量, 应用 (5) 式

$$i'' = a_3 e^{-a_4 t} \quad (5)$$

确定发电机的超瞬态参数。

## 2 参数求解算法研究

### 2.1 非线性最优化问题求解

衡量非线性最优化问题求解结果的准确性一般由误差准则判定, 误差准则也称为等价准则、损失函数、误差准则函数等。它通常被表示为误差的泛函数。记为:

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N f_i(\varepsilon(x)) \quad (6)$$

式中  $f$  是  $\varepsilon(x)$  的函数;  $\varepsilon(x)$  是定义在区间  $(0, N)$  上的误差函数。本文应用的是输出误差的平方函数, 即

$$f_i(\varepsilon(x)) = \varepsilon_i^2(x) \quad (7)$$

式中  $\varepsilon_i(x) = R_i - R(t_i)$ 。

$\{(t_i, R_i) | i=1, 2, 3, \dots, N\}$  为设计试验的测量数据。 $R(t_i)$  为模型输出数据。

对于同步发电机瞬态参数求解问题属于非线性最优化问题, 其求解方式一般采用下降迭代算法, 即在集合  $X$  上, 选定一个初始点  $x_0$ , 并置

$k=0$ , 然后按某种规则  $h$  把第  $k$  次迭代点  $x_k$  映射为后继点  $x_{k+1} \in X$ , 记作  $x_{k+1} = h(x_k)$ , 并称之为第  $k+1$  次迭代。如果得到一个迭代点列  $\{x_k\}$ , 那么其中的规则  $h$  称为迭代算法, 对于函数  $E(x)$  的每次迭代总有:

$$E(x_{k+1}) < E(x_k) \quad (8)$$

迭代的基本格式为

$$x_{k+1} = x_k + \lambda_k d_k \quad (9)$$

其中  $d_k$  为第  $k+1$  次搜索方向;  $\lambda_k$  为第  $k+1$  次步长因子。使用迭代算法解决非线性最优化问题的关键是如何构造每一次的搜索方向和确定适当的步长。

### 2.2 LM 算法

LM 算法是一种利用标准的数值优化技术的快速算法, 它是梯度下降法与高斯—牛顿法的结合, 也可以说成是高斯—牛顿法的改进形式; 它既有高斯—牛顿法的局部收敛性, 又具有梯度下降法的全局特性。由于 LM 算法利用了近似的二阶导数信息, 它比梯度法快得多。

非线性最优化的目标就是最小化目标函数

$E(x)$ , 令  $\nabla E(x)$  表示  $E(x)$  对  $x$  的梯度, 则有

$$\frac{\partial E(x)}{\partial x} = \nabla E(x) = J^T(x) e(x) \quad (10)$$

其中  $J^T(x)$  表示为  $x$  的 Jacobi 矩阵, 即

$$J^T(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} \\ \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial x_1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\nabla^2 E(x) = J^T(x)J(x) + \nabla^2 e(x)e(x)$  为  $x$  的 Hessian 矩阵。设目标函数具有二阶连续偏导数,  $x_k$  是  $E(x)$  的极小点的第  $k$  次近似值, 对目标函数进行二阶 Taylor 展开得

$$E(x) = E(x_k) + \nabla E(x_k)^T s + \frac{1}{2} s^T \nabla^2 E(x_k) s \quad (12)$$

其中  $s = x - x_k$ 。

将式(12)对  $s$  求导并令其为零得:

$$\frac{\partial E(x)}{\partial s} = \nabla E(x_k) + \nabla^2 E(x_k) s = 0 \quad (13)$$

当 Hessian 矩阵正定, 解式(9)得

$$s = -[\nabla^2 E(x_k)]^{-1} \nabla E(x_k) = -[J^T(x)J(x)]^{-1} J(x)e(x) \quad (14)$$

上式即为 Gauss-Newton 的计算法则。

最速下降法是最简单的优化策略, 并线性收敛。数值试验证明, 当目标函数的等值线接近一个圆(球)时, 最速下降法下降较快, 而当目标函数的等值线是一个扁长的椭球时, 最速下降法开始几步下降较快, 后来出现锯齿现象, 下降十分缓慢;

而 Gauss-Newton 算法当  $e_i(x)$  接近于零或  $e_i(x)$  接近线性函数从而  $\nabla^2 e_i(x)$  接近于零时 Hessian 矩阵

的  $\nabla^2 e_i(x)e_i(x)$  才可以忽略, 称为小残量, 否则称为大残量。Gauss-Newton 法对于零残量问题具有二次收敛速率, 而对于大残量问题收敛速度较慢

或不收敛, 如果  $J(x_k)$  不满秩, 方法没有定义。

由于上述两种算法在使用时的缺陷, 而且通常  $e(x)$  是非线性函数, Gauss-Newton 算法用线性化模型代替  $e(x)$ , 得到线性最小二乘策略, 这种线性化并不对所有的  $(x - x_k)$  都成立, Levenberg 和 Marquart 引进了一个正定矩阵  $\mu_k I$  对 Gauss-Newton 法进行了修改, 得到 LM 算法, 其形式为

$$s = -[J^T(x)J(x) + \mu I]^{-1} J(x)e(x) \quad (15)$$

式中比例系数  $\mu > 0$  为常数,  $I$  为单位矩阵。

从式(15)中可见, 如果比例系数  $\mu = 0$ , 则为 Gauss-Newton 法; 如果  $\mu$  取值很大, 则 LM 算法接近最速下降法。每迭代成功一步, 则  $\mu$  减小一些, 这样在接近误差目标的时候, 逐渐与 Gauss-Newton 法相似。Gauss-Newton 法在接近误差的最小值的时候, 计算速度更快, 精度也更高。由于 LM 算法利用了近似的二阶导数信息, 它比最速下降法快得多。实践证明, 采用 LM 算法可以较原来的最速下降法提高速度几十甚至上百倍。另外由于

$[J^T(x)J(x) + \mu I]$  是正定的, 所以式(15)的解总是存在的, 从这个意义上说, LM 算法也优于 Gauss-Newton 法, 因为对于 Gauss-Newton 来说,

$J^T(x)J(x)$  是否满秩还是个潜在的问题。在实际的操作中,  $\mu$  是一个试探性的参数, 对于给定的  $\mu$ , 如果求得的  $s$  能使误差指标函数  $E(x)$  降低, 则  $\mu$  降低; 反之, 则  $\mu$  增加。用式(14)修改一次权值和阈值时需要求  $n$  阶的代数方程( $n$  为网络中权值数目)。LM 算法的计算复杂度为  $O(\frac{n^3}{6})$ , 若  $n$  很

大, 则计算量和存储量都非常大。然而, 每次迭代效率的显著提高, 可大大改善其整体性能, 特别是在精度要求高的情况下。

### 3 三相突然短路试验数据处理过程

工厂应用日本横河 YOKOGAWA 数字示波器 DL750 对三相突然短路试验进行数据采样, 采样

数据以(.WVF)格式的波形文件进行保存。为了通过软件对试验数据进行辨识处理,需要将波形文件转换为文本文件。图 1 为同步发电机 QFSN-1000-2

在  $U_t = 0.4U_N$  时的三相突然短路电流试验数据,

图 2 是其中 a 相电流试验数据。

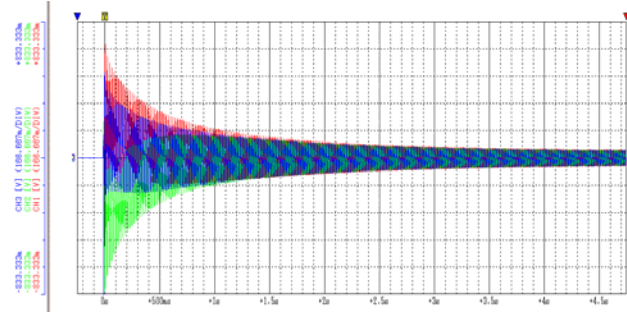


图 1 三相突然短路电流波形

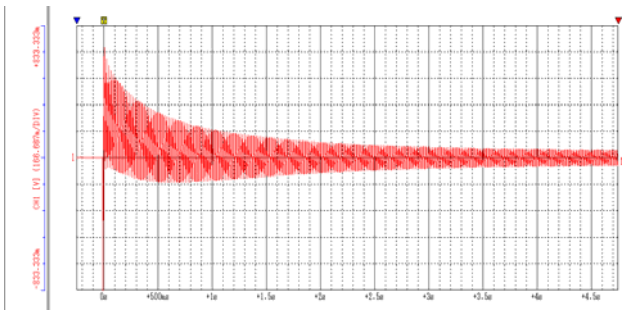


图 2 a 相短路电流波形

### 3.1 数据处理的计算机实现

计算机实现上述处理过程有两个需要关心的问题:

(1)采集到的原始试验数据是一个相当大的离散点多维数组,各点之间的时间相等(为采样时间),我们所关心的是其中是电流波峰或者波谷的点的位置和大小。用程序判断一个点是不是波峰波谷点有几个困难。如图 3 所示,我们要找的点是非局部极大值点,但因为噪声干扰,这个极大值点可能并不是邻近几个数中最大的,也有可能零附近出现噪声造成的我们不需要的极大值点。对于第一个问题,应兼顾可能的极大值点附近的几个数据综合考虑,对这几点用二次多项式进行局部拟合,找出最接近理想值的极大值点;对第二个问题,则对极大值点的大小进行限制,绝对值未超出给定大小的限制值的极大值点,我们都将其作为噪声处理。采用这些技术处理后得到的极大值点基本上就是我们想要的包络线上

的点了。

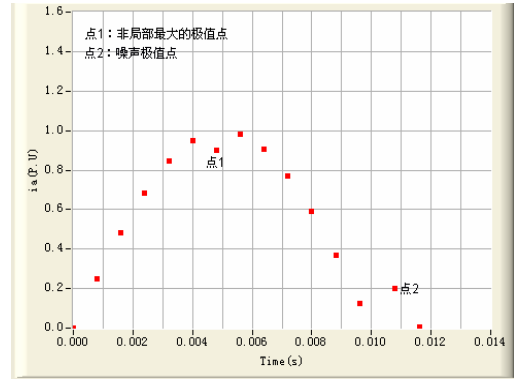


图 3 受到噪声干扰的波形

(2)上面得到的上下包络线数组的每个元素都代表一个波峰或波谷点,因为波峰和波谷不会出现在同一时间,所以包络线的加减不能简单的将包络线数组元素对应的相加减。这里需要用到另外一个时间数组,等间隔规定好新数组元素的大小后,分别从上下包络线中用线性插值的办法得到相应于该时间的包络线值,将它们加和减的结果分别储存到两个数组,这两个数组就是电流的周期分量和非周期分量值。

然而,上述算法只是标准规定方法在计算机上的简单复现。标准规定的数据处理方法在实用上

是不够准确的,因为曲线  $(\Delta I'_{k(0)} + \Delta I''_{k(0)})$  的后半

部通常均呈略下凹的弧形,因而通过该段圆弧作切线延长或者作直线拟合时可有多种不同的选择,而这段圆弧离原点较远,直线斜率上细小的变化都会是其延长线与坐标轴的交点有较大的移动,由此得出  $X'_d$ 、 $X''_d$ 、 $T'_d$ 、 $T''_d$  参数也会在较大的范围内波动,呈现大的分散性,有文献指出受影响最大的  $T''_d$  有时偏差可达 50% 以上。但标准中并没有规定检验的方法来审核所得参数的合理性,因此三相突然短路法虽然是一个重要的参数测试试验,却常常要参考其他试验所求得的参数甚至是设计值来酌定,这就减弱了三相突然短路试验的意义和重要性。

### 3.2 LM 算法实现

对同步电机三相突然短路试验的数据进行处理以求参数,在数学上实际是一个曲线拟合的问题。如果我们不采用分离曲线的办法,而采用 LM 非线性最小二乘回归方法按改进模型分段拟合发电机的短路电流峰值曲线辨识发电机的动态参数,得

到的参数的可信度将大大提高。为此，文章采用了 LM 算法来处理三相突然短路试验数据。

在 LM 算法中，初值的选择是比较重要的，它关系到迭代是否能够收敛和收敛的速度。我们把按标准规定的方法求出的动态参数值作为初值，由于这样的选择通常可以保证初值与真值不会相差几倍以上，所以可以最大可能的保证辨识过程收敛，基本解决了初值选择的问题。

LM 算法在计算机上数学实现的主要过程如下：

- ①给出训练误差允许值  $\varepsilon$ ，系数  $\beta, \mu_0$  以及初始化权值和阈值向量  $X^{(0)}$ ，令  $k = 0$ ， $\mu = \mu_0$ ；
- ②计算网络输出；
- ③按式(11)计算 Jacobian 矩阵  $J(x)$ ；
- ④分别按式(15)、式(12)计算  $s$  和  $E(x^{(k)})$ ；
- ⑤若  $E(x^{(k)}) < \varepsilon$ ，转到式(12)，否则，以  $x^{(k+1)}$  为权值和阈值计算误差函数  $E(x^{(k+1)})$ ；
- ⑥若  $E(x^{(k+1)}) < E(x^{(k)})$ ，则令  $k = k + 1$ ， $u = u / \beta$ ，回到②；否则这次不更新权值和阈值，令  $x^{(k+1)} = x^{(k)}$ ， $u = u\beta$ ，并回到④；
- ⑦结束。

LM 算法的流程图如图 4 所示。

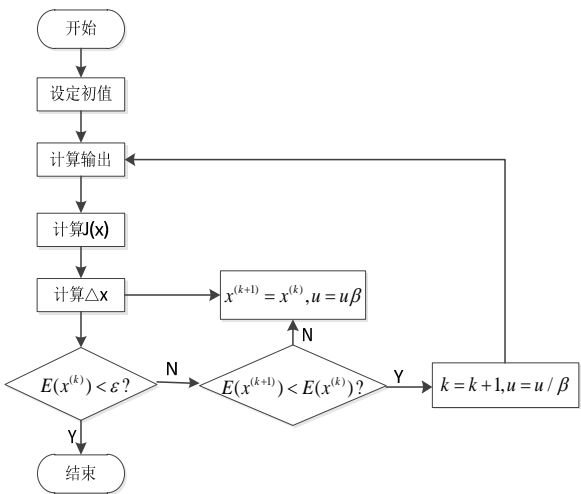


图 4 LM 算法流程图

图 5 是三相突然短路试验数据处理主界面。

面板上方是采集到的原始数据波形，左下是一些需要输入的采集参数和稳态电压电流值等，右下则是计算出来的电机参数，我们将按照标准规定算法得到的参数作为迭代的初值分别代入自编函数和 CVI 库函数进行计算，即可得到同步发电机所需的动态参数。

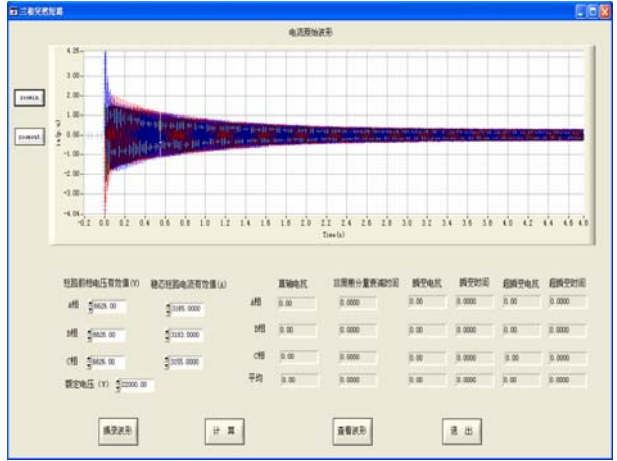


图 5 三相突然短路试验数据处理主界面

3.3 实际应用

本文以东方电机厂提供的 QFSN-1000-2 型同步电机为例，在试验中分别运用国家标准中规定的传统方法和基于改进模型应用 LM 算法辨识动态参数的方法计算得出的直轴瞬变参数结果在表 1 列出。

表 1 直轴瞬变参数对照表

参数	设计值	传统方法	LM 算法
$X'_d$	0.2485	0.2602	0.2508
$X''_d$	0.1896	0.1941	0.1906
$T'_d$ (s)	1.2562	1.2383	1.2488
$T''_d$ (s)	0.035	0.0324	0.0320
$T_a$ (s)	0.288	0.2791	0.2762

4 结论

通过对实际同步发电机的三相突然短路试验数据的辨识结果，验证了运用三相突然短路模型的改进模型和 LM 算法计算被试发电机瞬态参数的可行性。通过计算结果的比较可以看出，相对传统方法来说，LM 算法的求解结果精度更高。

参考文献：

[1] 王建新,杨世凤,隋没力. LabWindows/CVI 测试技术及工

程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

- [2] 宋美红. 基于小波变换的同步电机三相突然短路的参数辨识[J]. 电子世界, 2014(1): 61-62.
  - [3] 李兴源, 朱瑞可, 王渝红, 等. 基于 EMD 和 Prony 算法的同步电机参数辨识[J]. 电网技术, 2012, 8(36): 136-139.
  - [4] 倪良华, 李先允. 基于改进混合遗传算法的同步电机参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 1(38): 51-55.
  - [5] 徐明义. 小波算法消除突然三相短路试验数据的噪声[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 2(16): 118-121.
- 

**作者简介:**

王红星 (1986—), 男, 江苏赣榆人, 工程师, 主要从事电力调度工作及电机测试研究;

张恒伟 (1990—), 男, 江苏徐州人, 工程师, 主要从事电力调度工作;

刘 惺 (1989—), 男, 陕西渭南人, 博士, 主要从事电机测试研究。