

# 瞬态恢复电压波形参数提取算法的研究

徐燕飞<sup>1</sup>, 张桂红<sup>1</sup>, 王安<sup>2</sup>, 周会高<sup>2</sup>, 李彦明<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Study on Algorithms for Waveform Parameters of Transient Recovery Voltage

XU Yan-fei<sup>1</sup>, ZHANG Gui-hong<sup>1</sup>, WANG An<sup>2</sup>, ZHOU Hui-gao<sup>2</sup>, LI Yan-ming<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要: 采用一种基于最小二乘原理和牛顿迭代原理的方法计算了一种瞬态恢复电压波形参数, 对于电压波形中不同的参数采用不同的多项式进行了局部拟合计算。结果表明, 此方法具有较好的精确度。

关键词: 最小二乘法; 牛顿迭代法; 曲线拟合; 参数计算

中图分类号: TM835.2

文献标志码: A

Abstract: This paper presented a method based on the least squares theory and Newton iteration method to calculate the parameters of transient recovery voltage waveforms. Different polynomial expression had been used for partly fitting according to different parameters. The calculating results show that it has relatively high precision.

Key words: least squares theory; Newton iteration method; curve fitting; parameter calculation

## 0 引言

当线路发生短路故障时, 断路器等开关电器中会流过短路电流。短路电流大到一定程度, 断路器的触头分离, 弧隙中产生电弧。当电流过零电弧熄灭时, 由于电路中电容、电感的存在, 弧隙电压需要经过一个恢复过程才能上升到电源电压, 这个恢复过程中首先产生的电压即为瞬态恢复电压 (TRV)<sup>[1]</sup>。TRV 的时间很短, 只有几十微秒至几毫秒。大量的研究和试验分析表明, TRV 上升率和幅值是影响断路器开断的最重要因素<sup>[2]</sup>, 其主要参数为峰值电压 (参考电压)、到达峰值电压的时间等。图 1 是一种 TRV 的波形图。

对于图 1 所示的这种 TRV 波形, 只需要用以下几个参数来表示: 波形的峰值电压  $U_{max}$ 、从起始时刻 O 起到达峰值电压的时间  $t_3$  以及电压波形的时延时间  $t_d$ <sup>[3]</sup>。这种方法虽然很直观, 但不能得到足够精确的结果。随着数字化测量仪器的发展, 在计算机的帮

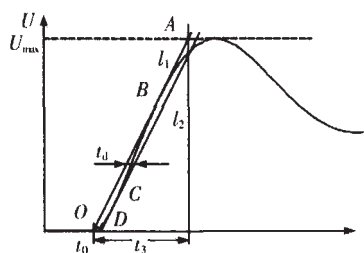


图 1 瞬态恢复电压波形图

助下, 将数字信号处理技术用于波形参数的提取是图形方法的理想替代。根据采样信号的特点, 在采样数据上进行适当的拟合是正确计算的基础<sup>[4]</sup>。

## 1 参数计算方法

对采样的 TRV 离散数据进行参数计算, 首先需要对其进行曲线拟合, 根据波形的特征和运动走向决定选取哪一种基函数进行拟合。

### 1.1 峰值电压 $U_{max}$ 的计算

根据 TRV 波形峰值附近曲线类似于抛物线的特点, 可考虑基于最小二乘法的原理, 对峰值附近进行局部二次多项式拟合。

首先找到离散数据中的最大幅值点, 以该点为中心, 两边各再取临近的 P 个点 (P 具体取多少视采样频率和波形而定), 对这组离散数据 (共 2P+1 个点) 基于最小二乘原理进行二次多项式拟合。

给定一组测量数据  $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ , 基于最小二乘原理, 求变量 x 和 y 之间的函数关系  $(x, A)$ , 使它最佳逼近或拟合已知数据。  $(x, A)$  称为拟合模型,  $A=(a_0, a_1, \dots, a_n)$  是一些待定参数, 多项式拟合曲线的模型是  $(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\dots+a_nx^n$ 。方法是选择参数 A 使得拟合模型与实际采样值在各点的

残差的加权平方和最小, 即使得  $S=\min\{\sum_{i=1}^n w_i [(x,$

A)  $-y_j^2$ }, 其中  $w_j > 0$ , 是权系数。

设各数据点的权系数均为 1, 计算系数  $a_0, a_1, \dots, a_n$ 。根据最小二乘法原理, 系数  $a_0, a_1, \dots, a_n$  所确定的多项式, 应使下式取得最小值<sup>[4]</sup>。

$$(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_n x_i^n)]^2$$

则有  $\frac{\partial}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^j [y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_n x_i^n)] = 0$ , 其中  $j=0, 1, 2, \dots, n$ 。即

$$\sum_{i=1}^n (a_0 x_i^j + a_1 x_i^{j+1} + \dots + a_n x_i^{j+n}) = \sum_{i=1}^n x_i^j y_i, \text{ 得方程组}$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^n \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i^n & \sum_{i=1}^n x_i^{n+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n x_i^n y_i \end{bmatrix}$$

运用高斯消去法解此方程组即可求得多项式系数  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , 从而得到多项式拟合函数  $y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$ 。

基于上述最小二乘原理, 对波形最大幅值点两侧共 41 (P=20) 个数据点进行二次多项式拟合, 得到解析函数为  $y = a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ , 则当  $x = -a_1 / (2a_2)$ , 相应的函数值  $y$  即为 TRV 波形的峰值电压  $U_{\text{max}}$ 。

### 1.2 时间参数 $t_3$ 和 $t_d$ 的计算

TRV 波形起始时刻 O 的确定: 在 TRV 产生之前, 采样得到的数据主要是随机噪声和其它高频的干扰信号, 这些信号的幅值较小。先将离散信号进行消噪处理, 减少高频干扰, 提高信噪比, 再设定一个合适的阈值, 阈值的选取应略高于滤波后的剩余噪声的幅值。当采样信号幅值高于阈值时, 则认为该时刻为 TRV 波形的起始时刻 O。

要计算到达峰值电压的时间  $t_3$  以及电压波形的时延时间  $t_d$ , 需对电压波形的起始时刻 O 到取得峰值电压  $U_{\text{max}}$  时刻的这一段离散数据进行 5 次多项式曲线拟合, 得到拟合曲线的解析函数  $y = y(x) = C_5 x^5 + C_4 x^4 + C_3 x^3 + C_2 x^2 + C_1 x + C_0$ 。

拟合曲线的切线  $l_1$  要求通过波形起始时刻 O, 该切线的斜率  $k$  应满足  $k = y' = (y - y_0) / (x - x_0)$ , 其中  $y'$  为解析函数  $y(x)$  的一次导数,  $(x_0, y_0)$  为 TRV 波形起始时刻 O 的坐标。求取切线  $l_1$  只需需求取切点 B 的值, 见图 1。切点 B 可以根据牛顿迭代法对上述等式进行计算。

对于比较复杂的高次方程  $f(x) = 0$ , 其根一般很难用根式表示, 通常采用迭代法来近似计算方程的解。普通的迭代法是将原方程转化为  $x = g(x)$  进行迭

代计算, 但这种方法往往只是线性收敛, 为得到超线性收敛的迭代法, 通常采用  $f(x)$  的近似替代法<sup>[5]</sup>。

设  $x_k$  是方程  $f(x) = 0$  的根的近似值, 则按泰勒公式  $f(x) = f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) + \dots + \frac{1}{n!} f^{(n)}(x_k) (x - x_k)^n$ , 取前两项近似替代  $f(x)$  的线性方程  $0 = f(x) = f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k)$ , 可见当  $f'(x_k) \neq 0$  时,  $x_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_k)$ 。令上式左边为  $x_{k+1}$ , 则得到牛顿迭代法  $x_{k+1} = x_k - f(x_k) / f'(x_k)$ 。当  $|x_{k+1} - x_k| < \epsilon$  (为迭代精度),  $x_{k+1}$  即为方程  $f(x) = 0$  的近似解。

初始值  $x_0$  取起始点至峰值点之间的某个点, 进行迭代计算。计算到切点 B 后, 就确定了切线  $l_1$  和斜率  $k$ , 从而可以确定  $l_1$  与峰值电压水平线的交点 A 以及到达峰值电压的时间  $t_3$ 。

已计算出  $l_1$  的斜率  $k$ , 切线  $l_2$  是  $l_1$  的平行线, 则其具有相同的斜率  $k$ 。  $l_2$  与拟合曲线在 O 和 B 点之间只有唯一的切点 C, 因此只需计算切点 C 的值  $y = y(x) = k$ , 同样可以根据牛顿迭代法进行计算, 取起始点 O 的横坐标作为迭代计算的初始值  $x_0$ 。

根据牛顿迭代法计算到切点 C 的值后, 曲线的切线  $l_2$  也就确定,  $l_2$  和时间轴的交点 D 与起始时刻 O 的时间间隔即为电压波形的时延时间  $t_d$ 。

## 2 计算结果

对于拟合结果, 若应用实际值与拟合曲线值之差的绝对误差及相对误差大小分析结果准确性是不可靠的, 需采用相关指数  $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$  来衡量拟合曲线与原始采样数据的逼近程度, 即曲线配合的拟合度。其中  $y_i$  为采样数据点,  $(x_i)$  为拟合函数值,  $\bar{y}$  为所有采样数据的平均值, 即  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ 。相关指数  $R^2$  值愈接近于 1, 表示曲线配合的拟合度越好, 拟合值与实际采样值越接近, 计算结果准确性越高<sup>[6]</sup>。

为了验证该方法的有效性和精确性, 选取了一个波形类似 TRV 的函数  $f(t) = 100[-\cos(0.01t) + 1]$ , 其中  $t \in [0, 500]$ , 函数波形见图 2。图 3 为函数  $f(t)$  叠加噪声的波形图, 可假设该函数为  $f_2(t) = f(t) +$

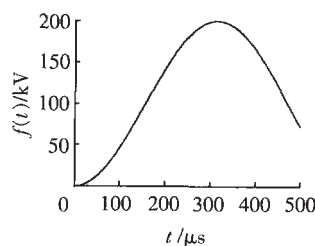


图2 函数  $f(t)$  的波形图

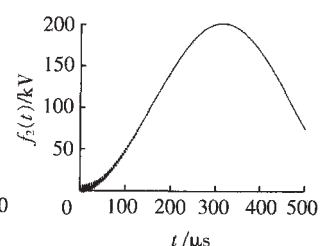


图3 函数  $f(t)$  叠加噪声的波形图

(下转第 217 页)

气体分析中气体组分与故障类型之间的复杂对应关系。笔者建立了基于KFDA的变压器故障诊断模型,通过分析具体选取了高斯型核函数,并采用基于交叉验证的网格搜索法来确定核函数的参数,取得了良好的效果。

(2)笔者将核Fisher判别分析技术初步应用于变压器故障诊断,还有一些问题需要深入研究。如何将核函数的具体形式同变压器油中溶解气体分析的先验知识相结合,并从理论上去分析选取最优参数,都有待于进一步的探讨和研究。

### 参考文献:

[1] DUVAL M, LANGDEAU F, GERVAIS P, et al. Acceptable Gas-in-oil Levels in Generation and Transmission Power Transformers [C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, Conference on 1990: 325-330.

[2] 徐文,王大忠,周泽存,等. 神经网络在变压器先生气体法故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 27-30.

[3] 颜湘莲,文远芳. 模糊神经网络在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 变压器, 2002, 39(7): 41-43.

[4] 张勇,李昕,刘君华,等. 数据融合技术在识别变压器油中四种特征气体的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 10-14.

[5] 王由华,刘振娟,李宏光. 混合型集成神经网络故障诊断方

法研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(1): 65-68.

[6] BAUDAT G, ANOUAR F. Generalized Discriminant Analysis Using a Kernel Approach [J]. Neural Computation, 2000, 12(10): 2385-2404.

[7] MULLER K R, MIKA S, GUNNAR R, et al. An Introduction to Kernel Based Learning Algorithms [J]. IEEE Trans Neural Networks, 2001, 12(2): 181-201.

[8] MA J H, PERKINS S, THEILER, et al. Modified Kernel Based Nonlinear Feature Extraction [C]// International Conference on Machine Learning and Applications, 2002: 127-132.

[9] 边肇琪,张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

[10] BROWNE M W. Cross-validation Methods [J]. Journal of Mathematical Psychology, 2000, 44(1): 108-132.

[11] 邓乃扬,田英杰. 数据挖掘中的新方法-支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[12] IEC 60599. Mineral Oil-impregnated Electrical Equipment in Service-guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis, Second Edition[S]. 1999.

[13] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[14] 中华人民共和国电力工业部. 电力设备预防性试验规程[Z]. DL/T 596-1996. 北京: 中国电力出版社, 1996.

[15] 张蕊,郭瑞君. 基于变压器故障分类的DGA特征提取[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 32-33.

(上接第213页)

$$5\sin(0.5 t)e^{0.01t}, t [0, 500].$$

对上述两个函数进行离散采样,采样间隔为1,采样501个数据点作为初始采样数据进行计算验证。笔者根据上述方法编制了相关的软件,对初始采样数据进行的参数计算,计算结果见表1。f(t)具有解析函数表达式,通过表达式根据参数的定义可计算较精确的参数值作为参考值来检验该方法的精确性。

表1 参数计算结果

	拟合法计算参数值				标准参考值
	f(t)	相对误差/%	f <sub>2</sub> (t)	相对误差/%	
U <sub>max</sub>	199.980	0.010	199.980	0.010	200.000
t <sub>3</sub>	276.421	0.149	276.549	0.195	276.010
t <sub>d</sub>	38.934	2.058	38.705	1.457	38.149

对TRV波形进行峰值计算的抛物线拟合时,相关指数R<sup>2</sup>=0.999 0;对电压波形的起始点至峰值点进行曲线拟合时,相关指数R<sup>2</sup>=0.999 9。可见采用最小二乘法对TRV波形进行拟合的结果非常逼近采样数据,具有良好的拟合效果,说明所采用的基于最小二乘法和牛顿迭代法计算TRV波形参数是一种非常有效且精确度很高的方法。

### 3 结论

(1)基于最小二乘法原理,采用多项式函数对TRV波形进行曲线拟合,可以得到很好的逼近,多项式最高项的次数可以根据波形的运动趋势进行合理选择。

(2)采用牛顿迭代法计算TRV波形的参数,可以得到精确的结果。

(3)笔者采用的方法用于计算只需2个参数表征的TRV波形的参数,具有一定的稳定性和较高的精度,能满足实际计算的要求。

### 参考文献:

[1] 王锡凡. 电力工程基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

[2] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[3] STL Technical Report. Harmonization of Data Processing Methods for High Power Laboratories[R]. 2003.

[4] 王晶,牟磊,李彦明,等. 大容量实验室电流波形参数计算机提取算法的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 44-46.

[5] 邓建中,刘之行. 计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

[6] 解西伦,张陆仁. 指数曲线拟合传染病发病率探讨[J]. 济宁医学院学报, 1997, 20(1): 55-56.