

一种改进的瞬时导数法计算阻抗方法

林富洪¹, 高莉², 朱博³, 隋佳音¹

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态监控教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 陕西省西安供电局, 陕西 西安 710032;
3. 福建省华能国际福州电厂, 福建 福州 350200)

摘要: 阻抗的精确测量有利于提高继电器动作速度和准确性。导数法是微机保护中最常用的一种算法之一。传统的导数法计算阻抗精度对滤波器滤高频能力和采样频率有较高的要求。无误差修正思想虽能克服该不足, 然而实时性较差。为了提高导数法计算阻抗的精度和实时性, 提出了一种改进的瞬时导数法计算阻抗方法。理论推理和仿真结果都证明了该方法所需的数据窗少, 有利于降低运算精度对数字滤波器滤高频能力和采样频率的高度依赖, 可以实时地计算阻抗。

关键词: 导数法; 继电器; 瞬时导数法; 微机保护算法

An improved instantaneous derivative method for computing impedance

LIN Fu-hong¹, GAO Li², ZHU Bo³, SUI Jia-yin¹

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Ministry of Education, Beijing 102206, China; 2. Xi'an Power Supply Bureau, Xi'an 710032, China;
3. Huaneng Fuzhou Electric Power Plant, Fuzhou 350200, China)

Abstract: Accurate measuring impedance can improve the rapidness and preciseness of relay. Derivative method is one of the most using of computer protection algorithms. Traditional derivative method for computing impedance is strongly depended on the sampling and the ability of high wavelet. Error amending can overcome the two shortcomings, but less in real-time performance. An improved method of instantaneous derivative method of computing impedance is put forward in this paper to improve the preciseness and real-time performance. The extent of depending on the sampling and the ability of high wavelet can be well promoted. Mathematical reasoning progress and the simulation results show that the method proposed in this paper has better real-time performance and less length of digital filter window.

Key words: derivative method; relay; instantaneous derivative method; computer-based protection algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0043-04

0 引言

微机保护算法的核心问题就是将连续型的电流、电压输入信号经过离散采样和模数变换转换成可用于计算机处理的数字量, 再算出可表征被监控对象运行特点的物理量, 如电流、电压等的有效值和相位以及复阻抗等, 或者算出它们的序分量、基波分量或某次谐波分量的大小和相位等, 将采样数据进行分析、判断, 以实现各种继电保护功能。一个好的算法应该是运算精度高, 所用数据窗短, 运算工作量小。显然, 运算精度高可使保护装置对区内、区外故障判断准确, 而算法所用数据窗短, 运算工作量小则有利于提高保护装置的动作速度, 然而这两者之间是相互矛盾的。若要计算精确则往往要利用更多的采样点和进行更多的计算工作量。

导数法计算阻抗是微机保护中最为常用的一种算法之一。导数法计算阻抗的精度和实时性取决于导数的如何处理。传统的导数算法采用差分运算来代替微分, 平均值代替瞬时值。该处理方法实现起来虽简单, 却也带来了传统导数法本身存在着两个缺点: 一是要求数字滤波器有良好的滤去高频分量的能力, 因为求导数将放大高频分量; 二是由于用差分近似求导, 要求有较高的采样率^[1-3]。为了克服这两个缺点, 又有一些文献提出了一种无误差修正的导数法计算阻抗方法, 该方法虽然克服了传统导数法的不足, 然而由于利用了超前的数据计算阻抗, 实时性差, 在实际工程运用中容易受扰动的影响^[5]。

为了提高导数法计算阻抗的精度和实时性, 本文提出一种改进的瞬时导数法计算阻抗方法。本文所给的算法利用本采样时刻和上一采样时刻的数据

计算本采样时刻的阻抗，实时性较好；而且能有效地避免差分近似求导时所带来的误差，可以降低运算精度对数字滤波器滤高频能力和采样频率大小的高度依赖。

1 导数法计算阻抗原理

在经过了性能较好的滤波之后，输入电气量可以假定为正弦信号。导数法属于假定输入正弦量的算法的一种，导数法指已知输入正弦量在某一时刻 t_1 的采样值及该时刻对应的导数，即可算出该正弦量的有效值和相位。以电流为例，设 i 为 t_1 时刻的电流瞬时值，表达式为 $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t_1 + \alpha) = \sqrt{2}I \sin \alpha_{11}$ ，则 t_1 时刻电流的导数为

$$i' = \omega \sqrt{2}I \cos \alpha_{11} \quad \text{或者} \quad \frac{i'}{i} = \sqrt{2}I \cos \alpha_{11} \quad \text{于是可得}$$

$$2I^2 = i^2 + \left(\frac{i'}{\omega}\right)^2; \quad \text{tg} \alpha_{11} = \frac{i'}{i} \omega; \quad i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{i'}{\omega} + ji\right)。$$

同理可得， $\dot{u} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{u'}{\omega} + ju\right)$

代入 $Z = R + jX = \dot{U} / \dot{I}$ 算得

$$X = \frac{u \frac{i'}{\omega} - \frac{u'}{\omega} i}{i^2 + \left(\frac{i'}{\omega}\right)^2}; \quad R = \frac{ui' - \frac{u'}{\omega} \cdot i}{i^2 + \left(\frac{i'}{\omega}\right)^2} \quad (1)$$

2 已提出的导数法计算阻抗方法

2.1 导数差分近似处理计算阻抗方法

传统的微机保护中，取 t_1 为两个相邻采样时刻 n 和 $n+1$ 的中点（如图 1 所示），经常采用差分运算来代替微分（如图 2 所示），相应该点的采样值要用平均求和来计算。

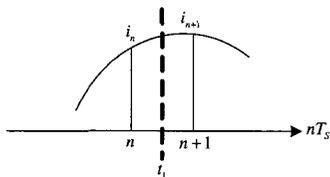


图 1 导数算法采样示意图

Fig.1 Sampling of derivative method

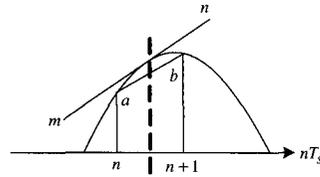


图 2 用差分近似求导示意图

Fig.2 Difference equations dealing with derivative method

差分: $i' = \frac{1}{T_s} (i_{n+1} - i_n), \quad u' = \frac{1}{T_s} (u_{n+1} - u_n) \quad (2)$

平均: $i = \frac{1}{2} (i_{n+1} + i_n), \quad u = \frac{1}{2} (u_{n+1} + u_n) \quad (3)$

将式 (2)、(3) 代入式 (1)，求出 R 和 X 。

传统导数法阻抗继电器原理的实现需要的数据窗较短，仅为一个采样间隔，且导数法的算式简单并不复杂。但由于用差分近似求导也带来了传统导数法本身存在着两个缺点：一是要求数字滤波器有良好的滤去高频分量的能力，因为求导数将放大高频分量；二是由于用差分近似求导，要求有较高的采样率。文献[1]中指出，对于 50 Hz 的正弦量，需要当采样率高于 1000 Hz 时，差分近似求导引入的误差小于 1%。

2.2 带延时无误差修正的导数法计算阻抗方法

针对传统导数法阻抗继电器原理中采用差分运算来代替微分，平均值代替瞬时值存在的几个不足，文献[1]又提出进行无误差修正思想。如图 3 所示。

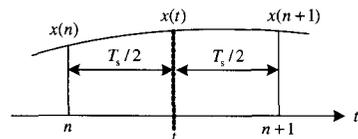


图 3 误差分析示意图

Fig.3 Error analysis

设信号表达式为 $x(t) = X_m \sin(\omega t + \alpha)$ ，

则 $\frac{dx(t)}{dt} = \omega X_m \cos(\omega t + \alpha)$

$$\frac{1}{T_s} [x(n+1) - x(n)] =$$

$$\frac{1}{T_s} \{X_m \sin[\omega(t + T_s/2) + \alpha] - X_m \sin[\omega(t - T_s/2) + \alpha]\} =$$

$$\frac{2}{T_s} \cdot X_m \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cdot \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right) =$$

$$\frac{2}{\omega T_s} [\omega \cdot X_m \cdot \cos(\omega t + \alpha)] \cdot \sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right)$$

从而可得,

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{\omega}{2\sin\left(\frac{\omega T_s}{2}\right)} \cdot [x(n+1) - x(n)] \quad (4)$$

根据式(4)可分别求出 $di(t)/dt$ 、 $du(t)/dt$, 代入式(1), 求得 R 和 X 。

通过式(4)可知, 利用 t 两个相邻采样时刻 n 和 $n+1$ 采样值, 无误差的求出 t 时刻的 $dx(t)/dt$ 。然而通过图3可知, 该无误差修正思想虽可以修正, 但属于利用超前了 $T_s/2$ 时刻的数据算出 t 时刻的导数和阻抗, 因此并不是根据 $i(t)$ 、 $u(t)$ 的实际瞬时值采样值进行实时的计算, 在实际工程运用时, 特别是在延迟时间内发生扰动时可能产生较大的误差^[3]。

3 改进的瞬时导数法计算阻抗方法

考虑传统的微机保护中采用差分运算来代替微分, 平均值代替瞬时值, 其运算精度对数字滤波器滤高频能力和采样频率大小有较强的依赖性。文献[1]中提出的无误差修正思想虽能解决该问题, 但该思想实际上是利用超前时刻的数据计算半采样间隔前的阻抗, 实时性不强, 不利于提高继电器的动作速度; 而且因存在延时, 在工程实际中容易受误差影响。因此, 本文提出一种改进的瞬时导数法阻抗原理, 该原理利用瞬时的采样值, 无延时的计算该采样时刻的阻抗。

考虑一正弦信号的瞬时表达式为

$$\begin{aligned} x(t) &= X_m \sin(\omega t + \alpha) = X_m \sin[\omega(t - \Delta t) + \alpha] = \\ &= X_m \sin[\omega(t - \Delta t) + \alpha] \cos \omega \Delta t + \\ &= X_m \cos[\omega(t - \Delta t) + \alpha] \sin \omega \Delta t \end{aligned}$$

即:

$$x(t) = x(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t + X_m \cos[\omega(t - \Delta t) + \alpha] \sin \omega \Delta t$$

可得

$$X_m \cos[\omega(t - \Delta t) + \alpha] = \frac{x(t) - x(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t}{\sin \omega \Delta t} \quad (5)$$

又因为

$$\begin{aligned} X_m \cos(\omega t + \alpha) &= X_m \cos[\omega(t - \Delta t) + \alpha] = \\ &= X_m \cos[\omega(t - \Delta t) + \alpha] \cos \omega \Delta t - \\ &= X_m \sin[\omega(t - \Delta t) + \alpha] \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得

$$X_m \cos(\omega t + \alpha) = [x(t) - x(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cot \omega \Delta t - x(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \quad (7)$$

根据式(7)可求得

$$I_m \cos(\omega t + \alpha) = [i(t) - i(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cot \omega \Delta t - i(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \quad (8)$$

$$U_m \cos(\omega t + \alpha) = [u(t) - u(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cot \omega \Delta t - u(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \quad (9)$$

Δt 为采样间隔时间。

式(8)、(9)实际是求得 i'/ω 和 u'/ω , 代入式(1)算得 R 和 X 。

由式(5)~(9)可知, 在使用这种方式求 i'/ω 、 u'/ω 和阻抗时, 由于 $\omega \Delta t$ 为常数, 其三角函数也是常量, 因此在实际使用中不需要进行三角函数计算, 还可以有效地避免差分近似求导所带来的误差, 可以降低运算精度对数字滤波器滤高频能力和采样频率大小的高度依赖。上述推导过程使用了本采样时刻和上一采样时刻的采样值进行实时计算本采样时刻的阻抗值, 所需的数据窗较短, 仅为一个采样间隔。而且做到了实时计算, 能够有利于提高继电器的动作速度。不存在延时, 能减小实际应用中受扰动的影响程度。

4 仿真

利用 PSCAD/Matlab 对本文提出的等效瞬时导数法计算阻抗方法进行仿真分析。某一系统的继电器所在线路正方向某处发生 AB 相间短路, 继电器测量到系统正常运行时、故障期间和故障切除后的三相电压、电流量经滤波器滤波后结果分别如图4、5所示。

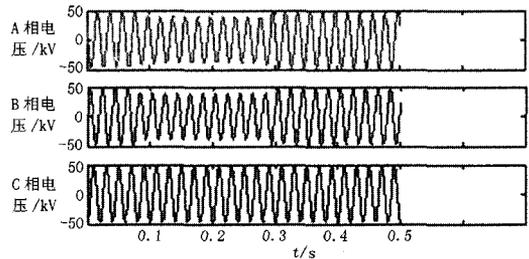


图4 三相电压曲线

Fig.4 Three-phase voltage curve

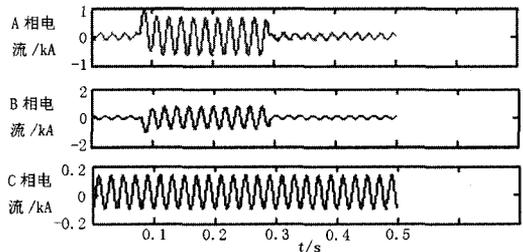


图5 三相电流曲线

Fig.5 Three-phase current curve

分别对导数差分近似处理计算阻抗方法和本文所提出的等效瞬时导数法计算阻抗方法进行仿真，仿真结果图 6 所示。

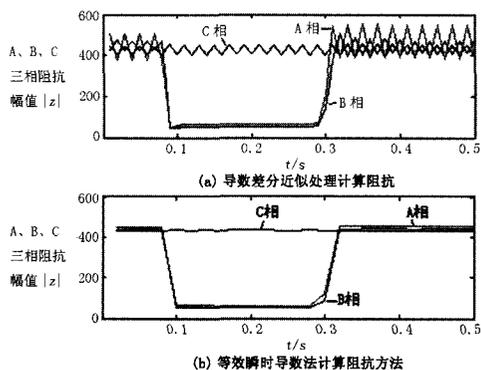


图 6 三相阻抗计算

Fig.6 Three-phase impedance competing

由图 6 的仿真结果可知，继电器测量到的三相电压、电流分量经同一滤波器滤波后，采用等效瞬时导数法计算阻抗原理仿真所得结果比导数差分近似处理计算阻抗方法所得的结果具有更好的准确性和稳定性。而且实际仿真过程中，继电器所测数据经滤波处理后仍会存在少量的高频分量，由图 6 可知，由于求导会放大高频分量，传统的导数差分近似处理计算阻抗方法所得到的结果有较大的波动，测量精度不够理想，反映了该方法对滤波器滤高频能力有较强的依赖性。从仿真结果看，等效瞬时导数法计算阻抗方法所得结果平稳，受少量高频分量的影响小，测量精度较好，从而有利于提高继电器的动作准确性。

5 结论

针对传统的导数算法对数字滤波器滤高频能力和采样频率大小的依赖性较强，无误差修正的导数法计算阻抗方法实时性较差等不足，本文提出了一种改进的瞬时导数法计算阻抗方法。数学理论推理和仿真结果都验证了本文所提出的方法有利于提高

导数法计算阻抗的精度和实时性，从而有利于提高继电器的动作速度和减小受扰动的影响。

参考文献

- [1] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护(第三版)[M].北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 陈德树, 尹项根. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京: 水力电力出版社, 1992.
- [3] 张举. 距离保护中若干问题的研究(硕士学位论文)[D].北京: 华北电力大学, 2003.
- [4] 刘毅, 温渤婴. 差分与傅氏变换相结合算法在微机电流保护中的应用[J].继电器, 2000, 28(8):36-38. LIU Yi, WEN Bo-ying. Applying the Algorithm of FFT with Difference Data in Microprocessor Based Current Protection[J].Relay, 2000, 28(8):36-38.
- [5] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58. YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu. An Improved Method of Instantaneous Symmetrical Components and Its Detection for Positive and Negative Sequence Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58.
- [6] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无时延的改进 d-q 变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 53-57. ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of Improved d-q Transform Without Time Delay in Dynamic Voltage Disturbance Identification [J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57.

收稿日期: 2008-05-22; 收稿日期: 2008-06-02

作者简介:

林富洪(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究领域为电力系统继电保护; E-mail: zuoyejinchen@163.com

高莉(1968-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护及配电自动化的技术管理工作;

朱博(1983-), 女, 助理工程师, 主要研究领域为火电厂燃料电气设备保护。

许继研制的焦作西 500 kV 变电站自动化系统顺利投运

近日, 许继研制的焦作西 500 kV 变电站自动化系统正式投入运行。投运过程顺利, 产品运行稳定, 许继受到了国家电网公司、河南省电力公司及焦作市供电公司的一致好评, 对于公司技术水平人员严谨认真的现场工作态度, 客户也特此致信感谢。

通过参与焦作西 500 kV 变电站的投运, 刚刚成立的许继电网公司河南分公司得到了全面锻炼。领导工作不分节假日, 认真积极探索公司的发展道路; 骨干员工身兼数职, 集思广益, 优化设计; 一线服务人员更是坚守岗位、兢兢业业, 为了一个个指标的经济性而精益求精。在公司领导的带领下, 全体员工认真贯彻落实集团“聚焦、精深、稳健、发展”八字方针, 积极解放思想, 扎实工作, 勇于创新, 努力以最好的成绩回报集团领导的关爱和支持。