

电力系统微机保护算法综合性能研究

钱可弭¹, 李常青²

(1. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510600;
2. 福州电业局 电力勘察设计所, 福建 福州 350009)

摘要: 首先, 介绍了基于不同交流采样模型的微机保护算法, 主要有基于纯正弦模型算法、基于周期函数模型算法及基于随机函数模型算法。对各个算法的原理进行了概述和分析, 同时对各种算法的滤波性能作了综合比较。重点分析了傅氏算法及其改进算法。最后, 对傅氏算法和卡尔曼滤波算法进行了比较。

关键词: 微机保护; 傅氏算法; 卡尔曼滤波算法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0043-03

0 引言

微机保护算法是微机保护研究的重点, 微机保护不同功能的实现, 主要依靠其软件算法完成。分析和评价各种不同算法优劣的标准是精度和速度。精度即微机保护根据输入量判断电力系统故障或不正常运行状态的准确程度。速度包括两个方面: 一是算法所要求的采样点数(或称数据窗长度); 二是算法的计算工作量。通常情况下, 精度和速度是相互矛盾的: 若要计算精确往往要用更多的采样点, 并进行更大的计算。因此, 微机保护算法研究的实质是如何在速度和精度两方面权衡, 根据实际微机保护系统的不同要求, 找到在满足精度前提下速度最快, 或是处理速度足够条件下精度最高的平衡点。

微机保护算法可分为两大类, 一类是把输入量的若干点采样值按照一定的数学式进行计算, 得到某些电参数的量值, 然后将它与定值进行比较、判断

的算法; 另一类是直接模仿模拟型保护的实现方法, 根据继电保护的功能或继电器的动作特性拟定的算法。第一类算法是研究的重点, 因为这类算法能充分利用微机的数值计算特点, 可实现许多常规继电保护无法实现的功能, 并且随着处理器等微机硬件的发展而不断进步, 代表着现代型微机保护算法发展的方向。下面对常用的交流采样算法作简单介绍并分析其各自的优缺点。

1 基于纯正弦函数模型算法

1.1 二点 90° 采样法

二点采样法对电路中电压和电流在任意时刻进行相隔 $T/4$ 采样, 通过计算获得电压和电流的有效值、有功功率和无功功率。对工频交流电而言, 二点采样法的数据窗为 $T/4 = 5 \text{ ms}$, 它的优点是计算简单快速, 克服了一点采样法要求输入对称三相电流和电压的缺点, 但是它同样没有滤波作用, 而且受直流分量影响最大。二点采样法对采样定时间隔要求精确等于 $T/4$, 否则将会带来误差。

收稿日期: 2004-11-25; 修回日期: 2005-02-20

作者简介:

张 钊(1978-), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 研究方向

向为电力系统仿真及配电网自动化(E-mail: zhangzhao78@sina.com)。

General matrix algorithm for distribution system fault locating

ZHANG Zhao

(Dept. of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A network describing incident matrix that depicts topology connection between distribution feeder sections and switches is introduced. Based on the model an algorithm is presented to locate faulty sections in distribution feeder network. It locates faulty sections directly and decides simultaneously which switches on the power source side should be cut off to isolate them. It also works for faults at branch ends of distribution network. Its program design is simple and further meets the need of real-time fault locating. It can be applied to system with multi-power sources and complex faults, which is proved correct by examples.

Key words: direct fault locating; network describing incident matrix; real-time performance; system with multi-power sources

1.2 三点采样法

三点采样法的数据窗为 $2\Delta T$, 对工频交流电以频率 $f_s = 600$ Hz 采样, 数据窗为 3.32 ms, 因此三点采样法比二点采样法快。它对采样定时要求简单, 只要保证等间隔且间隔时间稳定, 这在硬件上是很容易实现的。另外, 此法能消除直流分量影响, 但对三次谐波敏感。

1.3 均方根法

对于周期为 T 的交流信号, 设采样由 $t=0$ 处开始, 在一个整周期中均匀采样 N 点, 则第 n 点电压、电流采样值分别为 $U(n), I(n)$, 利用均方根法的公式计算可得到它们的有关电量参数。该算法的数据窗为一个整周期 T , 速度稍慢。由于该算法的结果是均方值, 它不仅对正弦波有效, 当采样点数较多时, 对波形畸变的电量也是有效的。

上述几种算法都是从电压、电流为纯正弦波的情况出发的。由于这些算法都是基于被采样的电压和电流是纯正弦变化, 而实际在发生故障时, 往往是在基波的基础上叠加有衰减的非周期分量和各种高频分量, 因此要求微机保护装置对输入的电流、电压信号进行预处理, 尽可能地滤除非周期分量和高频分量, 否则计算结果将会出现较大的误差。

2 基于周期函数模型算法

实际的电力系统在故障状态下输入量是直流分量、基波和各高次谐波的合成量, 并不是纯正弦函数。因此, 若采用基于正弦函数的算法, 则要求预先进行严格的滤波。滤波和算法总的计算时间和计算容量比较大。基于周期函数模型算法是将输入信号看作周期性函数, 或者可以近似地作为周期函数处理。当信号是周期函数时, 它可以被分解为一个函数序列之和, 即级数, 这是在时域的表现; 从频域看, 周期函数可以用一系列离散的频率分量表示。

微机保护中常用的有傅氏算法和沃尔什函数。傅氏算法是将周期函数分解为正弦和余弦分量, 最适合于微机保护计算基波分量和倍频分量。沃尔什函数由于其只有 ± 1 和 0 进行运算, 避免了很多乘、除法运算, 从而受到重视, 但它最后也将结果转换为傅氏级数的系数。本文将着重分析傅氏算法的特点。傅氏算法不再假设输入的电压、电流量为纯正弦量, 而是假设它们是由衰减非周期分量、基频和倍频分量所组成的。这些算法中最常用的是 FFT 算法及其推广, 由于它本身带有很强的滤除高次谐波的功能, 所以一般不需另外采用数字滤波器。

假定故障电流为如下形式:

$$i(t) = I_0 e^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^M I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n) = I_0 e^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^M [I_{Rn} \cos(n\omega t) + I_{In} \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

式中 $I_{Rn} = I_{mn} \sin \varphi_n; I_{In} = I_{mn} \cos \varphi_n$ 。

2.1 全波傅氏算法

全波傅氏算法在微机测控保护中得到了广泛的应用, 其原理已经很成熟了, 这里不再推导。根据傅

氏级数理论, 并加以离散化, 可得到全波傅氏算法的计算公式:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2)$$

经采样后, 连续量变为离散量, 积分变为求离散和:

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cos nk \frac{2\pi}{N}$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \sin nk \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

式中 N 为一个周期 T 中的采样数; k 为从故障开始时的采样点序号。

基波的有效值为

$$I = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2) / 2}$$

全波傅氏算法的优点是精度高、滤波效果好: 能滤除直流分量, 2, 3, $\dots, N/2$ 次谐波分量^[1], 且稳定性好。但这种算法需要一个周期内的 N 个采样数据, 其数据窗为一个整周期 T , 即 20 ms, 所以响应速度较慢。为了提高保护的速动性, 需要研究响应速度更快的滤波算法。

2.2 半波傅氏算法

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} i(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} i(t) \sin(n\omega t) dt \quad (4)$$

经采样后, 积分变为求离散和:

$$a_n = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \cos nk \frac{2\pi}{N}$$

$$b_n = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} i_k \sin nk \frac{2\pi}{N} \quad (5)$$

半波傅氏算法^[2]的特点是所需的数据窗比较短, 相当于全波傅氏算法的一半, 响应速度快, 但其滤波功能较弱, 不能滤除偶次谐波和直流分量^[2]。

3 基于随机函数模型算法

3.1 最小二乘滤波算法

最小二乘滤波算法的出发点是假定输入信号中的有效信息符合某一确定的模型, 将输入信息最大限度地拟合于这一模型, 并将拟合过程中剩余的部分作为误差量, 使其均方值减到最小, 从而可求出输入信号中的基频及各种暂态分量的幅值和相角。这时候得到的结果称为最小二乘意义下的最优估计值。在实用上, 最常用的模型是线性化的衰减直流分量加上基频分量和整数倍数的谐波分量。对带有衰减直流分量的周期函数, 或对非周期函数作周期延拓的情况下, 这种方法与傅氏算法结果是一样的。

该算法是假定输入信号是由衰减直流分量和有限项的整数倍谐波分量组成的, 将输入信号最大限度地拟合于这一函数模型, 并将拟合过程中剩余的部分作为误差量, 使其均方值减到最小。因此, 该算

法也存在误差。

实际应用中,最小二乘方算法可以任意选择拟合预设函数的模型,因此,可以消除输入信号中任意需要消除的暂态分量,只需在预设模型中包括这些分量即可。因而,该算法可获得很好的滤波性能和很高的精度。但预设的模型越复杂,精度越高,计算时间也越长。该算法的另一优点是能同时计算出输入信号中各种所需计算的分量。

3.2 卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波是由 Girgis 和 Brown 首次引入微机保护中^[3]。卡尔曼滤波算法,也称卡尔曼最佳线性估计,是从另一种最小均方估计误差的角度出发,以递推的形式实现。它是从短路的暂态信号中,通过不断的“预测-修正”递推运算最优地估计出基频相量。卡尔曼滤波用在多状态变量的估计上,需要矩阵运算,一般的微型机很难满足速度上的要求,致使卡尔曼滤波在微机距离保护上的应用在较长时间里,始终处在理论研究阶段。直到超大规模集成电路技术的飞速发展,出现了 DSP 等高性能向量信号处理器时,卡尔曼滤波算法才得以实际应用。

卡尔曼滤波算法的基本思想是根据某一系统的状态方程和观测方程,用估值算法对某个时刻的状态进行估计。估计的基本思路是:首先由前一采样时刻的估计值估计当前的估计值,然后用当前的观测值对它进行修正,这样,以递推方式逐步逼近真值。

文献[4]对傅氏算法和卡尔曼滤波算法的幅频响应进行比较,得出结论:傅氏算法对高次谐波有很好的抑制能力;卡尔曼滤波算法对高频随机信号的抑制能力更强。因此,在故障后的暂态过程中,卡尔曼滤波算法能够从随机噪声信号中得到基频分量的最佳估计。文献[5]论证了卡尔曼滤波算法某一状态分量的频率响应与以下4个因素有关:

- a. 系统状态转移矩阵;
- b. 观测数据窗位置(无限递推下去频率响应必然只剩系统状态转移矩阵中的分量);
- c. 误差协方差矩阵中该状态分量对应项与误差测量方差的比值;
- d. 输入噪声协方差矩阵中该状态分量对应项与误差测量方差的比值。

对计算机而言,卡尔曼滤波算法的计算量和存

储量较其他滤波算法大为减少,从而能较容易地满足实时计算的要求。高速继电保护装置不可避免地工作在输电线路故障后的暂态过程中,输入保护的电压信号和电流信号大都混有频谱复杂的高次谐波和非周期分量,卡尔曼滤波因其较高的收敛精度和较快的收敛速度,在电力系统微机保护中得到了越来越广泛的重视和应用。

参考文献:

- [1] 张红,王诚梅. 电力系统常用交流采样方法比较[J]. 华北电力技术,1999,(4): 25-27.
ZHANG Hong, WANG Cheng-mei. Comparison of normal alternating sampling methods in electric power system[J]. *North China Electric Power*, 1999,(4): 25-27.
- [2] 李永丽,陈超英,贺家李. 一种基于半波傅氏算法的继电保护快速算法[J]. 电网技术,1996,20(1): 52-55.
LI Yong-li, CHEN Chao-ying, HE Jia-li. A fast algorithm based on half-cycle Fourier algorithm for protective relaying[J]. *Power System Technology*, 1996,20(1): 52-55.
- [3] 丁书文,张承学,龚庆武,等. 半波傅氏算法的改进——一种新的微机保护交流采样快速算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(3): 18-20.
DING Shu-wen, ZHANG Cheng-xue, GONG Qing-wu, et al. An improved half-wave Fourier algorithm — A new fast algorithm for microprocessor based protection AC sampling[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(3): 18-20.
- [4] 郑建勇,巫海钢. 短数据窗傅氏算法在微机保护装置中的应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(9): 49-54.
ZHENG Jian-yong, WU Hai-gang. Study of short data window algorithm for microprocessor-based protection set[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000,24(9): 49-54.
- [5] BENMOUYAL G. Frequency-domain characterization of Kalman filters as applied to power system protection[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1992,7(3): 1129-1138.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

钱可弭(1971-),男,江苏常州人,工程师,主要研究方向为电力工程设计(E-mail:qiankemi@gedi.com.cn);

李常青(1969-),男,福建福州人,工程师,主要从事220 kV及以下输变电工程项目的设计工作(E-mail:licq69@126.com)。

Synthetic performance comparison of algorithms for microprocessor-based protections

QIAN Ke-mi¹, LI Chang-qing²

(1. Guangdong Electric Power Design & Research Institute, Guangzhou 510600, China;

2. Fuzhou Electric Power Bureau, Fuzhou 350009, China)

Abstract: Algorithms for microprocessor-based protections based on different AC sampling models are introduced, including pure sine model, cyclic function model and random function model. The principle of each algorithm is introduced and analyzed. Their filtering performances are synthetically compared. The Fourier algorithm and its improved algorithm are emphasized. Comparison is specially performed between Fourier algorithm and Kalman algorithm.

Key words: microprocessor-based protections; Fourier algorithm; Kalman algorithm