

电力系统微机保护算法的研究

杨丽徙 包毅 郝玉东 冯红建*
(郑州工业大学计自系)(郑州牧业工程高等专科学校, 450008)

摘 要 根据电力系统故障时的电压电流函数,从算法原理上重点分析了微机保护中随机函数模型的算法,并讨论了确定性函数模型算法的特点和应用范围。

关键词 微机保护算法;确定性函数模型;随机函数模型

中图分类号 T M 769

电力系统中微机保护的算法是指微机保护装置根据数据采集系统提供的实时离散的数据进行分析、运算和判断,以实现各种继电保护功能的方法。研究这些方法的目的在于找出好的算法,使之在满足工程精度和响应速度要求的前提下,尽可能减少数据采集量和计算时间,减少对输入数据的特定要求。对此,人们已经进行了大量的研究,提出了许多适于微机保护的计算方法。

根据电力系统对继电保护的速动性要求,保护装置所面对的是电力系统发生故障时的暂态过程。由于电力系统故障的随机性和引起故障的因素的复杂性,欲用精确的数学表达式来描述电力系统故障时的暂态电压电流信号是比较困难的。在实际过程中,可根据工程需要,作出不同的假设,将其电压电流函数用 3 个主要部分表示:(1) 衰减的非周期分量: $A_0 e^{-\beta_0 t}$; (2) 基波分量和整数倍频周期分量: $\sum_{i=1}^n A_i \sin(i \omega_1 t + \theta_i)$; (3) 非整数倍频周期分量: $\sum_{k=1}^m A_k \sin(\omega_k t + \theta_k)$, 其中: A_0 为 $t = 0$ 时非周期分量的数值; ω_1 为基波分量的角频率; A_i, A_k 为各周期分量的幅值; ω_k 为非整数倍频周期分量的角频率; β_0 为非周期分量的衰减因子; θ_i, θ_k 为各周期分量的初相位角。

将各非整数倍频分量和干扰用 W 表示,则电力系统发生故障时,电压电流函数的解析式为

$$f(t) = A_0 e^{-\beta_0 t} + \sum_{i=1}^n A_i \sin(i \omega_1 t + \theta_i) + W \tag{1}$$

即电力系统故障时的电压电流函数是在基波基础上,叠加有衰减的非周期分量、整数倍频周期分量、非整数倍频周期分量和其它干扰信号。

1 微机保护中的确定性模型算法

确定性模型算法是微机保护算法研究中出现最早且应用广泛的算法,包括以下几种:

1.1 基于正弦函数模型的算法

该算法假设输入的电压电流为基频正弦函数。根据正弦函数的性质,提出了两点乘积

收稿日期:1998-03-23

*(河南省建筑安装总公司, 郑州, 450003)

第一作者 女 1956 年 2 月生, 硕士学位, 副教授

算法、半周积分算法、Mann—Morrison 导数算法和Frodar—70 算法等。应用这些算法的前提是对输入的电压电流信号进行滤波预处理,否则计算结果将出现较大的误差。

1.2 基于周期函数模型的算法

该算法假设输入的电压电流为周期性函数,利用傅氏级数可将其分解为正弦函数和余弦函数,由此提出了富氏算法和沃尔什函数算法等。通过频域分析可知,这类算法可以有效地抑制各高次谐波,具有较好的滤波作用,但对于非整数倍的周期分量抑制能力较差。

1.3 基于RL 串联模型的算法

该算法假设被保护输电线路中的分布电容可以忽略不计,将输电线路等值为RL 串联电路模型,利用解微分方程的方法,可以直接求出故障线路的等值阻抗。

确定性模型算法主要适用于电力系统的中、低压网络和线路不太长的 220kV 输电线路保护,当用于高电压网络、长距离输电线路时,由于分布电容、并联电容或其它干扰的作用,就会产生较大的计算误差。

2 微机保护中的随机函数模型算法

该算法假设输入电压电流中所含各种成份均可以用精确的数学模型来描述。通过预设、拟合及补偿,可以准确地描述电力系统故障后的电压电流,以期达到较高的计算精度。从原理上来说,该算法适用于各种保护的计算。

2.1 基于随机函数模型的算法

由前面分析可知,电力系统发生故障时电压电流函数主要包括 3 个分量,这些分量的大小值、频率均是随机的函数。对于输入信号的拟合建模,可以通过采样窗口的周期延拓,将输入信号拟合于存在有限整数倍频率分量的数学模型。当输入信号只存在有限整数倍频率分量时,这种拟合是精确的。

如果对式(1)中的非整数倍频率分量等噪声 W 作周期延拓,此时电压电流函数表现为

$$f(t) = A_0'e^{-\beta t} + \sum_{i=1}^n A_i' \sin(i \omega t + \theta') \tag{2}$$

其中的 A_0' 和 θ' 与式(1)中的 A_0 和 θ 是不同的,式(2)中的 $e^{-\beta t}$ 可用泰勒级数展开

$$e^{-\beta t} = 1 - \beta t + \frac{(\beta t)^2}{2!} - \frac{(\beta t)^3}{3!} + \dots \tag{3}$$

根据工程精度要求,只取前两项即可。再将式(2)中的正弦项展开,则有

$$f(t) = A_0' - A_0'\beta t + \sum_{i=1}^n A_i' \sin(i \omega t) \cos \theta' + \sum_{i=1}^n A_i' \cos(i \omega t) \sin \theta' \tag{4}$$

由于在电力系统暂态过程中,随着谐波次数其所占比例越来越小,所以在微机保护中,可以首先假定在故障时,其高次谐波的次数如为:k=3,5,7 等,预设 1 个电压电流函数来拟合实际采样值,使每个采样值都满足该函数要求。该拟合函数的矩阵表达式为:

$$F = AX \tag{5}$$

其中
$$F = [f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_N)]^T \tag{6}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \sin 1 \omega_{L1} & \cos 1 \omega_{L1} & \cdots & \sin K \omega_{L1} & \cos K \omega_{L1} \\ 1 & t_2 & \sin 1 \omega_{L2} & \cos 1 \omega_{L2} & \cdots & \sin K \omega_{L2} & \cos K \omega_{L2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_N & \sin 1 \omega_{LN} & \cos 1 \omega_{LN} & \cdots & \sin K \omega_{LN} & \cos K \omega_{LN} \end{bmatrix}$$

(7)

F 是由 N 个采样值组成的 $N \times 1$ 列阵; A 为 $N \times M$ 阶阵, $M = 2k + 2, k$ 为计入采样值中高次谐波的次数。当时间 $t_i = 1, 2, \dots, N$ 确定时, 是一个常数阵, 可事先离线算出并存入程序。

$$X = [\beta_0, A_0' \beta_0, A_1' \cos \theta_1', A_1' \sin \theta_1', \dots, A_k' \cos \theta_k', A_k' \sin \theta_k']^T$$

(8)

X 是一个 $M \times 1$ 的待求列阵, 通过 X 可以求出输入信号中各次谐波分量的幅值和相角。

欲使方程有唯一解, 要求采样个数 $N \geq M$ 。若 $N = M, A$ 为常数方矩阵, 将式(5)两端左乘 A^{-1}

$$\begin{matrix} X & = & A^{-1} & F \\ M \times 1 & & N \times M & N \times 1 \end{matrix}$$

(9)

若取 $N > M$, 扩大数据, 增大列阵的规模以改善精度, 则 A 阵不再是方阵, 可利用 A 阵的伪逆矩阵

$$A^+ = [A^T A]^{-1} A^T$$

(10)

$$\begin{matrix} X & = & A^+ & F \\ M \times 1 & & N \times M & N \times 1 \end{matrix} \quad (N \geq M)$$

(11)

2.2 算法分析

采用预设函数模型后, 可以对输入信号进行拟合或采用最小二乘法算法。

2.2.1 预设模型的精度, 计算量的大小均与 k 值有关。

K 值为计入采样值中高次谐波的次数。在相关矩阵中, $M = 2k + 2, N \geq M$, 因此:

(1) 根据实际网络结构, 电压等级, 保护要求等参数, 选择适当的 k 值(如 $k = 5, 6, 7$ 等)。可以保证本算法获得很好的滤波性能和很高的精度;

(2) 根据保护要求, 可以同时计算出输入信号中各种所需要的计算分量, 而不需要对方程组全面求解。如在距离保护中, 只需要基波参数, 计算出 X 列阵中的元素 3 和元素 4

$$X_3 = A_1' \cos \theta_1', \quad X_4 = A_1' \sin \theta_1'$$

即可得从保护安装地点到短路点的阻抗

$$Z = \frac{X_3 X_3 + X_4 X_4}{X_3 X_3 + X_4 X_4} + j \frac{X_4 X_3 + X_3 X_4}{X_3 X_3 + X_4 X_4}$$

(12)

而在变压器差动保护中, 需要基波和二次谐波参数, 只需要求出 X 列阵中的元素 3, 4, 5, 6 即可。

2.2.2 预设模型的精度, 与采样频率、数据窗的大小、时间参考点的合理选择有密切关系。

采样频率是数据采集系统每秒钟采样的次数, 采样频率的选择是微机保护硬件设计、算法模型的 1 个关键问题, 需要综合考虑很多因素。采样频率越高, 对 CPU, ADC, MPX 等器件的要求越高。对软件来讲, 根据模型需要, 采样频率一般取值范围为 500~2000Hz。

数据窗是指微机保护算法在进行计算时,所需基本数据占采样点数或采样间隔的多少,数据窗越长,该算法响应速度越慢,对于随机函数模型,采用拟合建模时,完成 1 次计算,采样个数 N 应大于等于待求量 M , N 值越大,冗余度越大,计算精度越高,计算工作量越大。

2.3 最小二乘滤波的算法

随机函数拟合建模中,如果没有采样窗口的周期延拓且又有非整数倍谐波分量存在,即式(1)中的 W 不为零时,可以考虑采用最小二乘滤波的算法。根据采样离散数据,有方程组

$$\begin{matrix} F \\ N \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} A \\ N \times M \end{matrix} \begin{matrix} X \\ M \times 1 \end{matrix} + \begin{matrix} W \\ N \times 1 \end{matrix} \tag{13}$$

$$W(t) = [W(t_1), W(t_2), \dots, W(t_N)]^T \tag{14}$$

$W(t_i)$ 是 $t=t_i$ 时的误差,由于 W 的不确定性和不可测性,可以考虑当 W 的平方或 $W^T W$ 达到最小值时

$$W^T W = [F - AX]^T [F - AX] \tag{15}$$

$X=X$ 时,称 X 为最小二乘意义下 X 的最优估计值。

$$\text{令 } \frac{\partial W^T W}{\partial X} = 0, \text{ 得 } X = (A^T A)^{-1} A^T F \tag{16}$$

3. 结论

算法是研究微机保护的重要内容之一,根据电网结构、电压等级、线路长短,以及微机保护的硬件配置,可选择不同的算法。对于输入信号中暂态分量不丰富或计算精度要求不高的保护,可采用确定性模型的算法,如低压网络的电压、电流主保护和后备保护。在高压超高压电力系统中,由于铁磁元件的非线性、输电线的分布电容和补偿电容以及电压互感器、电流互感器的二次暂态过程的影响,使输入信号中含有大量的非周期分量和随机的非整数倍频分量,为保证计算精度,对距离保护、差动保护等,应考虑采用随机函数模型的算法。

参考文献

1 杨奇逊. 微型机继电保护基础. 北京:水利电力出版社,1988. 48~68

2 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 北京:水利电力出版社,1992. 54~88

3 张 举. 微型机继电保护装置原理与运行. 天津:天津科学技术出版社,1996. 58~68

Calculation Method of Microcomputer
Protection in Power System

Yang Lixi Bao Yi Hao Yudong

(Zhengzhou University of Technology)(Zhengzhou College of Animal Husbandry)

Feng Hongjian

(Henan Province Contruction and Installation General Company)

Abstract In this paper ,the calculation methods of the deterministic model and the stochastic model are discussed on the basis of the voltage and current function when power system is in trouble .

Keywords calculation method of microcomputer -based protection ; deterministic model ; stochastic model