

简化高压输电线计算机距离保护计算的方法

重庆大学电气工程系 胡立华

概 论

用计算机实现高压输电线的距离保护, 目前已有各种不同算法。这些算法大致可分为两类: 参数计算法和电流、电压的采样值计算法。这两类算法虽然能够完成距离保护的计算, 但却存在共同的不足之处, 都含有较大的计算量。特别是参数计算法, 由于需要先计算出线路的电气参数, 如电阻、电感、阻抗等, 再进行距离保护动作特性计算, 故计算步骤多、计算量大, 且参数计算本身就比较复杂, 这就给保护的实时计算带来困难。电流电压的采样计算法虽比参数计算法有较大改进, 计算量也有较大的减小, 但仍不能完全避免乘、除法的运算, 而且亦不能灵活地实现各种阻抗动作特性的计算。

本文简要地介绍了现有的几种距离保护的典型算法, 然后推导了另一类能够完全避免乘、除法运算的新的距离保护算法——电流、电压的幅值比较算法。这种新的算法不仅计算量很小, 而且能够灵活、方便地实现各种阻抗特性的计算, 如直线、圆、椭圆等。因而新的距离保护具有更大的实用意义。

一、现有距离保护算法简介

1. 参数计算法

参数计算法是较早的距离保护算法, 主要有以下几种:

①PRODAR70算法

PRODAR70算法出现于1973年 [1]。其计算公式如下:

$$Z^2 = \frac{U_M^2}{I_M^2} = \frac{v_K'^2 + v_K''^2}{i_K'^2 + i_K''^2} \quad (1)$$

$$\theta = \varphi_v - \varphi_i = \operatorname{tg}^{-1} \frac{i_K''}{i_K'} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{v_K''}{v_K'} \quad (2)$$

式中 v_K' 、 v_K'' 、 i_K' 、 i_K'' 分别为电压、电流的一阶和二阶导数, 可以用差分公式求出:

$$v_K' = \frac{1}{2h\omega} (v_{K+1} - v_{K-1}) \quad (3)$$

$$v_K'' = \frac{1}{h^2\omega^2} (v_{K+1} - 2v_K + v_{K-1}) \quad (4)$$

算出阻抗及幅角后,即可按给定的阻抗动作特性进行保护计算。

②微分方程算法

这一算法也是于1973年提出 [1]。从线路的微分方程:

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

应用差分公式,可导出方程组:

$$\begin{cases} v_K = Ri_K + \frac{L}{2h} (i_{K+1} - i_{K-1}) \\ v_{K-1} = Ri_{K-1} + \frac{L}{2h} (i_K - i_{K-2}) \end{cases} \quad (6)$$

解此方程组,即可求出线路阻抗。

③复数算法

复数算法于1975年提出应用 [2]。如果将电流、电压分解为正交的两个部份:

$$\begin{cases} \dot{U} = A_v + jB_v \\ \dot{I} = A_i + jB_i \end{cases} \quad (7)$$

则有:

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX = \frac{A_v A_i + B_v B_i}{A_i^2 + B_i^2} + j \frac{A_i B_v - A_v B_i}{A_i^2 + B_i^2} \quad (8)$$

正交分解的方法可采用一周波的付氏分解或沃尔希分解。

④正弦函数拟合算法

这一算法也出现于1975年 [3]。

$$\begin{aligned} \text{设 } i_K &= I_M \sin \omega t_K \\ v_K &= U_M \sin (\omega t_K + \varphi) \end{aligned}$$

可推出线路电阻及电抗的计算式:

$$\begin{cases} R = \frac{2v_{K-1}i_{K-1} - v_K i_{K-2} - v_{K-2} i_K}{2(i_{K-1}^2 - i_{K-2} i_K)} \\ X = \frac{v_{K-1} i_K - v_K i_{K-1}}{i_{K-1}^2 - i_{K-2} i_K} \end{cases} \quad (9)$$

其推导过程略,详见文献 [3]。

2. 电流、电压的采样值算法:

电流、电压的采样值算法出现较晚,它是根据电流、电压的采样值直接进行阻抗动作特性的计算,避免了参数计算的步骤,因此计算量有较大的减少。现有的算法有以下两种:

①位移算法:(文献 [4])

$$\begin{aligned} \text{设 } v &= U_M \sin \omega t \\ i &= I_M \sin (\omega t - \theta) \end{aligned}$$

取采样率 $N = 24$, 则采样间隔 $\omega h = 15^\circ$; $6 \omega h = 90^\circ$, 若令:

$$v = U_M e^{j\omega t} = U_M \cos \omega t + jU_M \sin \omega t = v_K + jv_{K-6}$$

$$i = I_M e^{j(\omega t - \theta)} = i_K + ji_{K-6}$$

可推得以下关系:

$$U_M^2 = v_K^2 + v_{K-6}^2 \quad (10)$$

$$I_M^2 = i_K^2 + i_{K-6}^2 \quad (11)$$

$$U_M I_M \cos \theta = v_K i_K + v_{K-6} i_{K-6} \quad (12)$$

$$U_M I_M \sin \theta = v_{K-6} i_K - v_K i_{K-6} \quad (13)$$

如将电流的采样位移一个特性阻抗角(继电器最大灵敏角) $75^\circ = 5\omega h$, 则有:

$$I_M e^{j(\omega t - \theta + 75^\circ)} = -i_{K-7} + ji_{K-1} \quad (14)$$

$$U_M I_M \cos(\theta - 75^\circ) = v_{K-6} i_{K-1} - v_K i_{K-7} \quad (15)$$

根据电动型方向阻抗继电器的典型动作方程:

$$z_1 U_M I_M \cos(\theta - \varphi) - U_M^2 - K_1 \geq 0 \quad (16)$$

将式(10)、(15)代入即得:

$$z_1 (v_{K-6} i_{K-1} - v_K i_{K-7}) - (v_K^2 + v_{K-6}^2) - K_1 \geq 0 \quad (17)$$

同样, 从电抗继电器动作方程:

$$z_2 I_M^2 - v_M I_M \sin \theta - K_2 \geq 0 \quad (18)$$

将式(11)、(13)代入即得:

$$z_2 (i_K^2 + i_{K-6}^2) - (v_{K-6} i_K - v_K i_{K-6}) - K_2 \geq 0 \quad (19)$$

② 阻抗电压变换法(文献[5])

$$\text{设 } v(t_K) = U_M \sin(\omega t_K + \theta)$$

$$i(t_K) = I_M \sin(\omega t_K)$$

将电流位移一个特性阻抗角 β , 并乘以整定阻抗, 得到特性阻抗电压:

$$v_2(t_K) = z_0 I_M \sin(\omega t_K + \beta) \quad (20)$$

再令 $v_1(t_K)$ 为变换电压:

$$\begin{aligned} v_1(t_K) &= v_2(t_K) - v(t_K) \\ &= z_0 I_M \sin(\omega t_K + \beta) - U_M \sin(\omega t_K + \theta) \end{aligned} \quad (21)$$

则有:

$$\begin{aligned} v(t_K) \cdot v_1(t_K) &= \frac{1}{2} [z_0 Z I_M^2 \cos(\theta - \beta) - Z^2 I_M^2] \\ &\quad - \frac{1}{2} [z_0 Z I_M^2 \cos(2\omega t_K + \theta + \beta) - \\ &\quad - Z^2 I_M^2 \cos(2\omega t_K + 2\theta)] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{式中 } Z = \frac{v(t_K)}{i(t_K)} = R + jX$$

将时间位移 $1/4$ 周期可得:

$$v(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) \cdot v_1(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) = \frac{1}{2} [z_0 Z I_M^2 \cos(\theta - \beta) - Z^2 I_M^2] +$$

$$+ \frac{1}{2} [z_0 Z I_M^2 \cos(2\omega t_K + \theta + \beta) - Z^2 I_M^2 \cos(2\omega t_K + 2\theta)] \quad (23)$$

将式(22), (23)相加, 消去后项得:

$$\begin{aligned} v(t_K) \cdot v_1(t_K) + v(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) \cdot v_1(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) \\ = z_0 Z I_M^2 \cos(\theta - \beta) - Z^2 I_M^2 \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)即为阻抗动作方程:

$$v(t_K) \cdot v(t_K) + v(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) \cdot v_1(t_K - \frac{\pi}{2\omega}) \geq 0 \quad (25)$$

相应的阻抗动作特性为:

$$z_0 Z \cos(\theta - \beta) - Z^2 \geq 0$$

$$\text{即: } \begin{cases} Z \geq 0 \\ Z \leq z_0 \cos(\theta - \beta) \end{cases} \quad (26)$$

得到方向阻抗继电器的标准动作方程。

电流、电压的采样值算法虽然较参数算法优越, 但仍不能完全避免乘、除法的运算。另外, 这一类算法只能实现比较简单的方向阻抗继电器的计算, 因此, 寻找一种更加简便, 灵活的阻抗算法, 具有很大的实用意义。为此目的, 先讨论几种简化计算的方法。

二、简化计算方法

在本文推导的阻抗算法中, 共应用了三种简化计算的方法。

1. 幅值计算的积分方

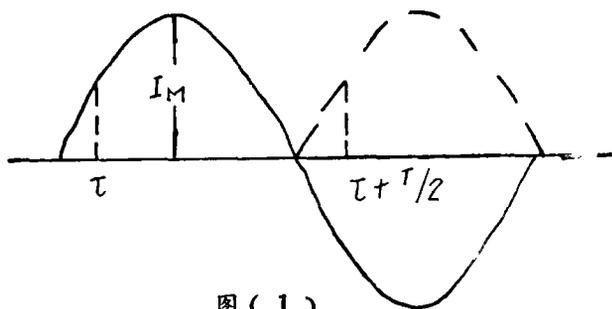
法正弦量的幅值可用积分的方法计算:

设

$$i = I_M \sin \omega t$$

将 i 的绝对值在半周期

内积分, 可得:



图(1)

$$\int_{\tau}^{\tau+T/2} |i| dt = \int_{\tau}^{\tau+T/2} I_M |\sin \omega t| dt = 2 I_M$$

$$\text{故有: } I_M = \frac{1}{2} \int_{\tau}^{\tau+T/2} |i| dt \quad (27)$$

应用矩形积分公式, 上式可写成:

$$I_M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N-1} |i_k| \cdot \omega h \quad (28)$$

再应用递推算法, 可进一步简化:

$$I_{M(k)} = I_{M(k-1)} + \frac{\omega h}{2} (|i_k| - |i_{k-N/2}|) \quad (29)$$

将常数 $\frac{\omega h}{2}$ 并入定值或其他因素中考虑, 就能够在幅值计算中避免乘、除法的运算,

此时, 幅值计算式可表为:

$$I'_M(k) = I'_M(k-1) + |i_k| - |i_{k-N/2}| \quad (30)$$

用积分方法计算幅值, 存在固有计算误差。误差的大小与采样率有关, 图(2)是计算误差与采样率的关系曲线。当采样率 $N \geq 12$ 时, $e < \pm 3\%$, 已能满足保护计算所需精度。

2. 直角三角形弦长的近似计算
对于直角三角形的弦长, 有计算公式:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (31)$$

如此计算, 运算量相当大。

为了简化计算, 按图(3)所示, 用折线代替弦长, 可得出其近似值, 计算公式为:

$$\begin{aligned} c &= (b-a) + \sqrt{2}a \\ &= \max(a, b) + (\sqrt{2}-1) \cdot \\ &\quad \cdot \min(a, b) \end{aligned} \quad (32)$$

式中 $\max(a, b)$, $\min(a, b)$ 为取 a, b 中较大(或较小)的那个数。

在近似计算中, 只包含一次乘法运算, 因此计算量有较大的减小。由于折线总长于直线, 故近似计算总有正的计算误差。从图(3)中, 如令 $c=1$, $a=\sin\alpha$, $b=\cos\alpha$, ($\alpha \leq 45^\circ$), 可得出误差函数:

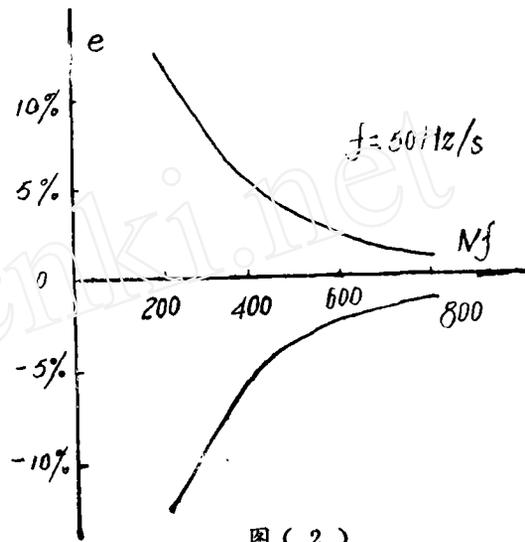
$$\begin{aligned} e_1 &= \max(a, b) + (\sqrt{2}-1)\min(a, b) - \\ &\quad - \cos\alpha + (\sqrt{2}-1)\sin\alpha - 1 \\ &= 1.0824\sin(\alpha + 67.5) - 1 \end{aligned} \quad (33)$$

最大误差出现在 $\alpha = 22.5^\circ$ 时,

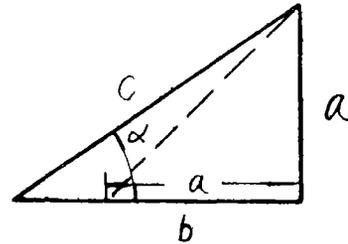
$$e_{1max} = 8.24\%$$

计算误差曲线如图(4)所示。

为了降低最大误差限, 也为了使近似计算避免进行乘、除运算, 可将式(32)修改为:



图(2)



图(3)

$$\begin{aligned}
 c &= \max(a, b) + \frac{1}{3} \min(a, b) \\
 &= \frac{1}{3} [3 \max(a, b) + \min(a, b)] \quad (34)
 \end{aligned}$$

相同的推导可求出此时的误差函数为:

$$e_2 = \frac{\sqrt{10}}{3} \sin(\alpha - \operatorname{tg}^{-1} 3) - 1 \quad (35)$$

最大误差限为

$$e_{2 \max} = \begin{cases} +5.41\% & (\alpha = 18.4^\circ) \\ -5.72\% & (\alpha = 45^\circ) \end{cases}$$

公式修改后的计算误差也表示在图(4)中。

用式(34)计算弦长,如将常数1/3并入其他因素考虑,就能避免乘、除法运算,此时:

$$\begin{aligned}
 c' &= 3 \max(a, b) + \min(a, b) \\
 &= 2 \max(a, b) + a + b \quad (36)
 \end{aligned}$$

3. 阻抗的整定值计算

阻抗的定值计算是对一个未知常数作乘法运算。如果在一定取值范围内将整定值规格化,也就是只取一些标准的数作为整定值,就能使定值计算用位移和加、减运算来完成。为说明这一方法,以简单的全阻抗继电器为例进行讨论。

全阻抗继电器动作方程为:

$$|Z| \leq z_0 \quad (37)$$

$$\text{即 } \frac{U_M}{I_M} \leq z \quad \text{或} \quad U_M \leq z_0 I_M \quad (38)$$

式中 U_M 、 I_M 可用前述积分方法简单地算出。 z_0 为整定值,不能预先确定,因此式中乘法运算不可避免。

如假定 z_0 的整定范围为0.25~40欧,并只取其中的一些标准的数为定值,即令:

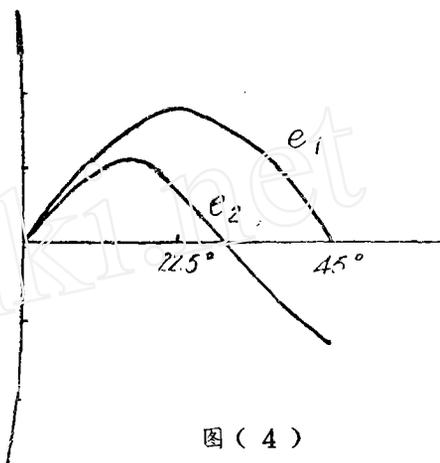
$$z_0 = 2^{K_1} + K_2 \cdot 2^{K_3} \quad (39)$$

此时,继电器动作方程可表为:

$$U_M \leq (2^{K_1} + K_2 \cdot 2^{K_3}) I_M \quad (40)$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 为整数。

由此可见,整定值的乘法运算可化为位移和加减运算。表(1)给出了在0.25~40欧的范围内,标准定值所对应的 K_1 、 K_2 、 K_3 的值。



图(4)

表 1 标准定值所对应的 K_1 , K_2 , K_3

z_0	K_1	K_2	K_3	z_0	K_1	K_2	K_3
0.25	-2	0	0	7.875	3	-1	-3
0.375	-2	1	-3	8	3	0	0
0.5	-1	0	0	8.125	3	1	-3
0.625	-1	1	-3	8.25	3	1	-2
0.75	-1	1	-2	8.5	3	1	-1
0.875	0	-1	-3	9	3	1	0
1.0	0	0	0	10	3	1	1
1.125	0	1	-3	12	3	1	2
1.25	0	1	-2	14	4	-1	1
1.5	0	1	-1	15	4	-1	0
1.75	1	-1	-2	15.5	4	-1	-1
1.875	1	-1	-3	15.75	4	-1	-2
2	1	0	0	16	4	0	0
2.125	1	1	-3	16.25	4	1	-2
2.25	1	1	-2	16.5	4	1	-1
2.5	1	1	-1	17	4	1	0
3	1	1	0	18	4	1	1
3.5	2	-1	-1	20	4	1	2
3.75	2	-1	-2	24	4	1	3
3.875	2	-1	-3	28	5	-1	2
4	2	0	0	30	5	-1	1
4.125	2	1	-3	31	5	-1	0
4.25	2	1	-2	31.5	5	-1	-1
4.5	2	1	-1	32	5	0	0
5	2	1	0	32.5	5	1	-1
6	2	1	1	33	5	1	0
7	3	-1	0	34	5	1	1
7.5	3	-1	-1	36	5	1	2
7.75	3	-1	-2	40	5	1	3

根据所给定值进行标准化处理, 自动确定 K_1 、 K_2 、 K_3 的值, 可以用定值给定程序自动完成。附录 1 给出了定值给定的程序框图。

采用式(39)的两项和的形式对整定阻抗进行标准化处理, 运算比较简单, 也易于说明这一方法。但实际应用时, 对于一些特殊的定值, 将存在较大整定误差。设 z_1 , z_2

为两相邻的标准定值， z 为实际整定值，（ $z_1 < z < z_2$ ），当取 z_1 或 z_2 为计算整定值时，其最大误差为：

$$e_{max} = \pm \frac{z_2 - z_1}{2z_1} \% \quad (41)$$

从表1，令 $z_2 = 1.5$ ， $z_1 = 1.25$ ，可算出最大整定误差为 $e_{max} = \pm 10\%$ 。
为了减小最大整定误差，实际的定值计算可采用三项和的形式，即令：

$$z_0 = 2^{K_1} + K_2 \cdot 2^{K_3} + K_4 \cdot 2^{K_5} \quad (42)$$

此时，最大整定误差可小于 $\pm 3\%$ 。

三、电流、电压的幅值比较算法

有了以上的简化计算方法，就能够推导出不用乘、除运算的阻抗保护算法——电流、电压的幅值比较算法。幅值比较式阻抗保护，在常规的保护中也得到广泛的应用，但是在计算机阻抗保护中，采用幅值比较式的阻抗保护算法，目前还未见这方面的资料介绍。本文推导的幅值比较算法，根据其不同的特点，可以分为两种：

1. 电流电压矢量差算法

从电流与电压的矢量差的幅值，可以推导出直线型及方向阻抗继电器的动作方程：

①过原点的直线（功率方向）

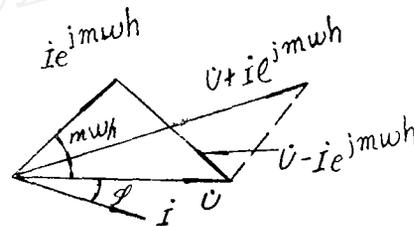
$$\text{设 } \dot{U} = U_M \sin \omega t$$

$$\dot{I} = I_M \sin(\omega t - \varphi)$$

将电流位移 m 采样后，得：

$$\dot{I}e^{jm\omega h} = I_M \sin(\omega t - \varphi + m\omega h)$$

从图（5），根据余弦定理，



图（5）

可求出 \dot{U} 与 $\dot{I}e^{jm\omega h}$ 的矢量差的幅值。

$$|\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 = U_M^2 + I_M^2 - 2U_M I_M \cos(m\omega h - \varphi) \quad (43)$$

$$|\dot{U} + \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 = U_M^2 + I_M^2 + 2U_M I_M \cos(m\omega h - \varphi) \quad (44)$$

将式（43）、（44）相减：

$$\begin{aligned} |\dot{U} + \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 &= 4U_M I_M \cos(m\omega h - \varphi) \\ &= 4I_M^2 Z \cos(m\omega h - \varphi) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\text{令： } |\dot{U} + \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 \geq 0$$

$$\text{即： } |\dot{U} + \dot{I}e^{jm\omega h}| - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}| \geq 0 \quad (46)$$

相应的阻抗动作特性为：

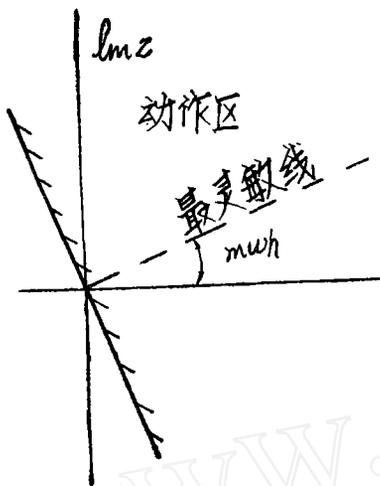
$$Z \cos(m\omega h - \varphi) \geq 0 \quad (47)$$

图(6)为式(46)所代表的阻抗动作特性。由式(47)可知,这是阻抗平面上过原点的直线,其最灵敏线与实轴的夹角为 $m\omega h$ 。当取不同的 m 值时,可得到斜率不同的直线族。从式(46)还可看出,过原点的阻抗动作特性实现起来非常简单,只需进行两次幅值计算即可完成。

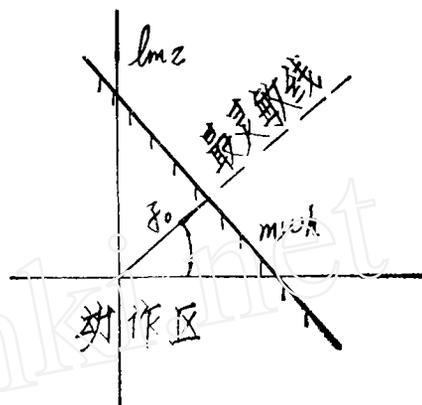
②任意直线阻抗特性

从式(43)可得,

$$\frac{U_M^2 + I_M^2 - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|^2}{2I_M^2} = Z\cos(m\omega h - \varphi) \quad (48)$$



图(6)



图(7)

对于不过原点的直线阻抗特性,其动作方程可表为:

$$Z\cos(m\omega h - \varphi) \leq z_0 \quad (49)$$

将式(49)代入(48),可推得:

$$U_M^2 + (1 - 2z_0)I_M^2 \leq |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|^2 \quad (50)$$

根据整定值 z_0 的不同,动作方程可分为三种情况:

a) 当 $z_0 = \frac{1}{2}$ 时,方程简化为:

$$U_M - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}| \leq 0 \quad (51)$$

b) 当 $z_0 < \frac{1}{2}$ 时, $(1 - 2z_0) > 0$,应用上一节叙述的弦长近似算法,式(50)

可简化为:

$$3 [\max(U_M \sqrt{1 - 2z_0} I_M) - |\dot{U} - \dot{I}e^{jm\omega h}|] + \min(U_M \sqrt{1 - 2z_0} I_M) \leq 0 \quad (52)$$

c) 当 $z_0 > \frac{1}{2}$ 时,同样可得:

$$3 [U_M - \max(\sqrt{2z_0 - 1} I_{M1} |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|)] - \min(\sqrt{2z_0 - 1} I_{M1} |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|) \leq 0 \quad (53)$$

从式(51)~(53)可知,当整定阻抗 $z_0 = \frac{1}{2}$ 时,直线型阻抗继电器的实现最为简单。当 $z_0 \neq \frac{1}{2}$ 时,动作方程中也只含有一个与整定阻抗 z_0 有关的常数乘法运算。同样可采用前述方法,将其进行标准化处理后化为位移和加、减运数。

③方向阻抗特性

方向阻抗动作特性的计算与任意直线特性的计算相似。仍从式(43)可推得:

$$\frac{U_M^2 + I_M^2 - |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|^2}{2U_M^2} = \frac{1}{Z} \cos(m\omega h - \varphi) \quad (54)$$

方向阻抗动作方程为:

$$Z \leq z_0 \cos(m\omega h - \varphi) \quad (55)$$

$$\text{或: } \frac{1}{Z} \cos(m\omega h - \varphi) \leq \frac{1}{z_0} \quad (56)$$

将式(56)代入式(54)可推得:

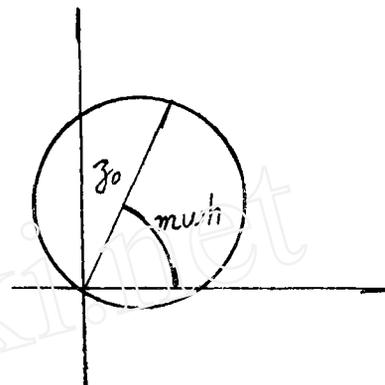
$$(1 - \frac{2}{z_0}) U_M^2 + I_M^2 \geq |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|^2 \quad (57)$$

根据定值 z_0 的不同,上式可写为:

$$\left\{ \begin{array}{l} 3 [I_M - \max(\sqrt{\frac{2}{z_0} - 1} U_{M1} |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|)] - \min(\sqrt{\frac{2}{z_0} - 1} U_{M1} |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|) \geq 0 \quad (z_0 < 2) \\ U_M + I_M - |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}| \geq 0 \quad (z_0 = 2) \\ 3 [\max(\sqrt{1 - \frac{2}{z_0}} U_{M1} I_M) - |\dot{U} - \dot{I}e^{im\omega h}|] + \min(\sqrt{1 - \frac{2}{z_0}} U_{M1} I_M) \geq 0 \quad (z_0 > 2) \end{array} \right. \quad (58)$$

由式(58)可知,方向阻抗特性的实现也与直线阻抗完全相似。

用电流、电压的矢量差进行距离保护的计算,可以完全避免乘、除法的计算,且实现继电器的动作特性也比较方便和灵活,但却有两个不足之处:第一,误差较大。其误差为三个方面①幅值计算误差;②弦长近似计算误差;③标准定值与实际定值之间的误差。三项误差中,第二项误差较大,且具有随机性。其余两项误差可分别采用提高采样率和以三项和的形式进行整定值的标准化的方法,使其受到限制。第二个不足之处是,同一阻抗特性的动作方程,根据整定值的不同,其形式也不相同。因此保护程序设计较为麻烦。在这一方面,以下叙述的阻抗更换法具有更大的优点。



图(8)

2. 阻抗变换法

这一算法是从阻抗平面上给定的动作方程推导而来。由于这种算法避免了弦长近似计算，因此其计算误差较小，而运算量比前一算法更小，形式更简单。

① 过零直线

在阻抗平面上的过零直线方程为：

$$|Z + z_0 e^{jm\omega h}| \geq |Z - z_0 e^{jm\omega h}| \quad (59)$$

令 $z_0 = 1$ ，方程简化为：

$$|Z + e^{jm\omega h}| \geq |Z - e^{jm\omega h}| \quad (60)$$

代入 $Z = \dot{U} / \dot{I}$ ，

即得出式 (46)：

$$|\dot{U} + \dot{I} e^{jm\omega h}| \geq |\dot{U} - \dot{I} e^{jm\omega h}|$$

与算法 1 推导结果相同。

② 任意直线

阻抗平面上不过零点的直线方程为：

$$|Z| \leq |Z - 2z_0 e^{jm\omega h}| \quad (61)$$

亦即：

$$|\dot{U}| \leq |\dot{U} - 2z_0 \dot{I} e^{jm\omega h}| \quad (62)$$

当 $z_0 = \frac{1}{2}$ 时，可得到式 (51)

与算法 1 结论相同；对于 z_0 为任意值，按照幅值计算式 (28)，上式可写为：

$$\sum |v_k| \leq \sum |v_k - 2z_0 i_{kf} m| \quad (63)$$

式 (63) 表示，将电流的采样值位移 m 采样后，乘以整定常数 $2z_0$ ，再与电压采样相减后作幅值计算，并与电压幅值进行比较，就能完成直线阻抗保护计算。由此可看出，这一算法的计算非常简单，计算量也很小。

③ 方向阻抗

方向阻抗动作方程为：

$$\left| Z - \frac{z_0}{2} e^{jm\omega h} \right| \leq \frac{z_0}{2} \quad (64)$$

亦即：

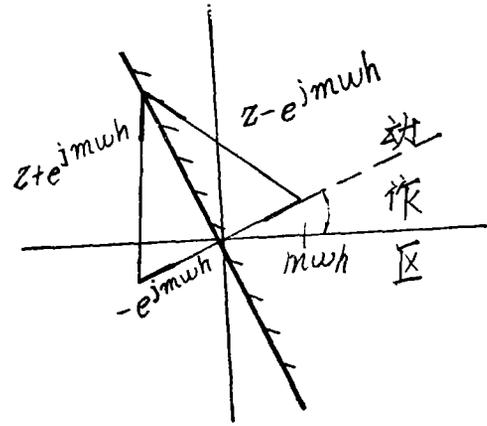


图 (9)

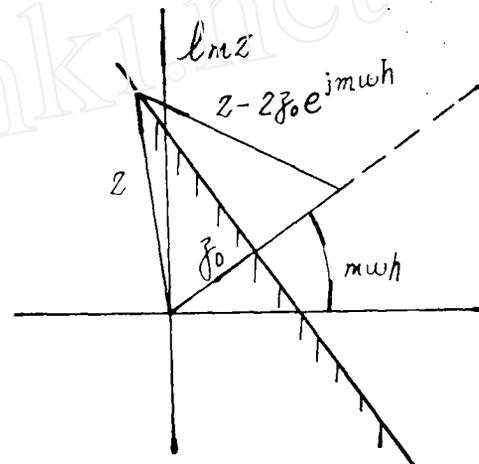


图 (10)

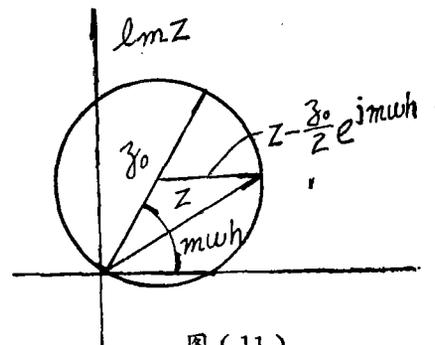


图 (11)

$$|U - \frac{z_0}{2} \dot{I} e^{jm\omega h}| \leq \frac{z_0}{2} |\dot{I}| \quad (65)$$

或:

$$\Sigma |v_k - \frac{z_0}{2} i_{k+n}| \leq \Sigma |\frac{z_0}{2} i_k| \quad (66)$$

其实现与直线阻抗完全相同。

按照同样的方法对于偏移特性阻抗继电器:

$$|Z - \frac{z_1 z_2}{2} e^{jm\omega h}| \leq \frac{z_1 + z_2}{2} \quad (67)$$

椭圆特性阻抗继电器:

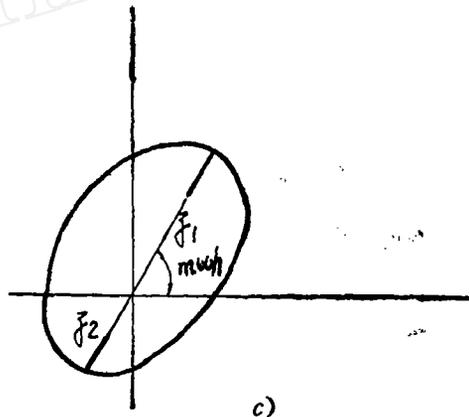
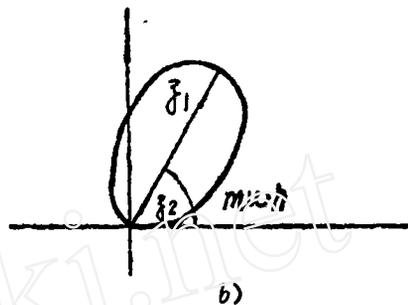
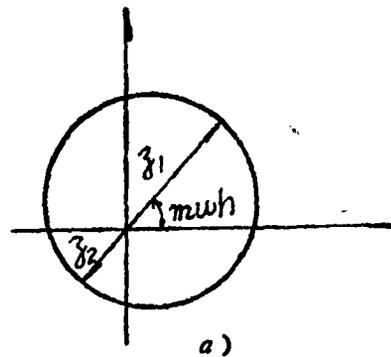
$$|Z - (z_1 - z_2) e^{jm\omega h}| + |Z - z_2 e^{jm\omega h}| \leq z_1 \quad (68)$$

偏移椭圆特性阻抗继电器:

$$|Z| + |Z - (z_1 - z_2) e^{jm\omega h}| \leq z_1 + z_2 \quad (69)$$

等均能够方便灵活地实现。

用幅值比较法实现距离保护,其继电器的最大灵敏角只能是采样间隔的整数倍,因此,在选择采样频率时,应考虑这一因素,使其满足最大灵敏角的要求。另外,幅值比较法需进行半周波积分,故这一算法的故障响应时间为半个周期。但由于积分运算具有低通滤波作用,除直流暂态分量对计算的影响较为严重外,其余各次谐波的影响均较小,且能完全抑制偶次谐波分量,故采用本算法可以降低对数字滤波器的要求。相对于其他方法来说,总的的数据窗和故障响应时间不会显著增加,而计算量却能减小到最低限度。因此本算法具有较大的实用意义。



图(12)

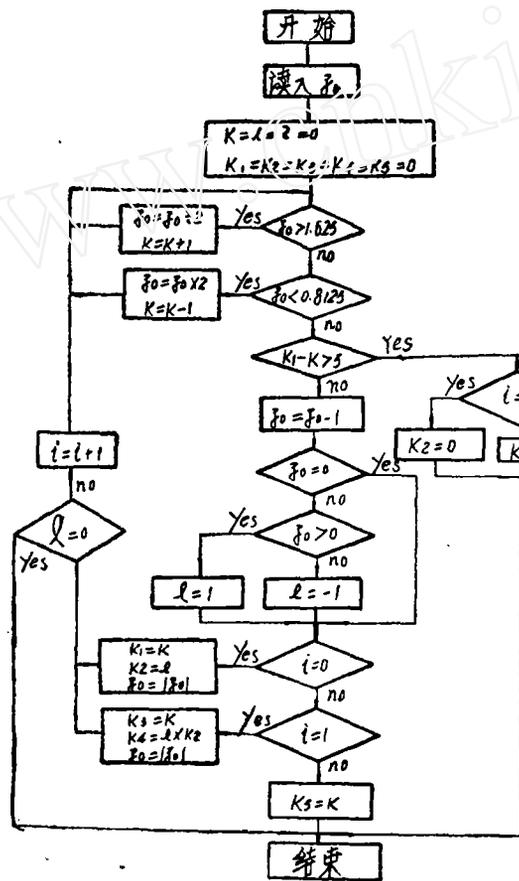
参 考 文 献

1. IEEE Tutorial Course: Computer Relaying 79 EHO 148-7-PWR
2. A.M.Ranjbar and B.J.Cory " Algorithms for Distance

Protection" Ibid pp. 276-283

3. J. G Gilbert and R. J. shovlin. " High speed Transmission Line Fault Impedance Calculation Using a Dedicated Micro computer". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol 94 NO. 3 1975 pp. 872-883
4. I. Mitai, M, Yamaura and M. Okamura, " Distance Protection by Digital Technique ", IFAC Symposium 1977.
5. Y. Miki, Y. Sano and J. Makino ", " Study of High Speed Distance Relay Using Microcomputer ", IEEE Trasaction on Power Apparatus, and Systems, Vol PAS-96, NO. 2, 1977.pp. 602-613.

附录：整定值标准化程序框图



简要说明

给定初值

将 \$j_0\$ 分解
\$j_0 = 2^k (1.625^l)\$

当尾数小于首项的
\$2^{-5}=0.03125\$ 倍时
略去不计程序结束

\$j_0=0\$ 时输出结果
后结束

决定 \$j_0\$ 的符号

首次循环得出

\$j_0 = 2^{K_1} + K_2 j_0\$

以 \$j_0\$ 作二次循环

得 \$j_0 = 2^{K_1} + K_2 2^{K_2} + K_4 j_0\$

最后

\$j_0 = 2^{K_1} + K_2 2^{K_2} + K_4 2^{K_5}\$