

500kV电力系统故障暂态的数值计算

水电部南京自动化研究所 夏期玉 许真

提 要

本文在分析500kV电力系统简单故障的故障暂态计算方法的基础上,对于在复合故障及考虑负荷影响的情况下故障暂态的计算作了探讨,并且设计了相应的计算程序。计算结果与试验结果的对比,证明了数学模型和程序设计的正确性。整个程序可以计算20个结点的网络在故障后30ms内的暂态过程,

前 言

500kV电力系统中,反应故障分量的各类保护装置的应用日渐广泛。目前,对简单故障的故障分量的研究,已不敷定性和定量地分析500kV系统在复合故障情况下保护装置的动作行为之需。考虑到500kV系统及其保护装置的特点,本文在分析该类系统简单故障的故障暂态计算方法的基础上,对于在复合故障及考虑负荷影响的情况下故障暂态的计算作了探讨,并且设计了相应的计算程序。计算结果与试验结果的对比,证明了数学模型和程序设计的正确性。所设计的程序具有计算故障类型可以自由选择、输出方式灵活等特点。

此外,本文采用直接输入的方式来读入故障,这样可以比常规方式更能节约机时。

一、集中参数电路数学模型

1. 电 感

如图1-1所示,电感L两端结点f、m的电压为 $u_f(t)$ 和 $u_m(t)$,从结点f流向m的电流为 $i_{fm}(t)$ 我们有:

$$u_f(t) - u_m(t) = L \cdot \frac{di_{fm}(t)}{dt} \quad (1-1)$$

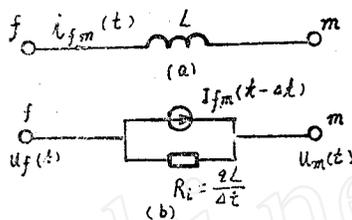


图1-1电感的特征线法等值电路

将上式用梯形积分法则处理,则可算出:

$$i_{fm}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [u_f(t) - u_m(t)] + i_{fm}(t - \Delta t) \quad (1-2)$$

式(1-2)中

$$I_{fm}(t - \Delta t) = i_{fm}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [u_f(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)] \quad (1-3)$$

$I_{f_m}(t-\Delta t)$ 可由比时刻 t 早 Δt 的 i_{f_m} 、 u_f 、 u_m 的过去记录值来决定, 这样, 式 (1-3) 可用图 (1-1 (b)) 的等值电路来表示。图中 $R_L = \frac{2L}{\Delta t}$, 其误差随 Δt 取值的减小而减小。

2、电容:

如图 1-2 所示, 电容两端电压差为:

$$u_f(t) - u_m(t) = \frac{1}{c} \int_{t-\Delta t}^t i_{f_m}(t) dt + [u_f(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)] \quad (1-4)$$

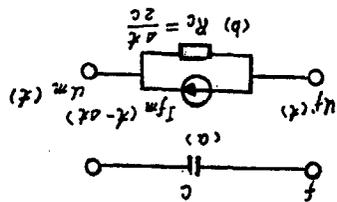
按照梯形积分法则, 可算得:

$$i_{f_m}(t) = \frac{2c}{\Delta t} [u_f(t) - u_m(t)] + I_{f_m}(t-\Delta t) \quad (1-5)$$

上式中

$$I_{f_m}(t-\Delta t) = -i_{f_m}(t-\Delta t) - \frac{2c}{\Delta t} [u_f(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)] \quad (1-6)$$

$I_{f_m}(t-\Delta t)$ 可由比时刻 t 早 Δt 的 i_{f_m} 、 u_f 、 u_m 的过去记录值来决定, 式 (1-5) 可用图 1-2 (b) 所示的等值电路来表示。图中



$R_c = \frac{\Delta t}{2c}$, 其误差取决于 Δt 取值的大小

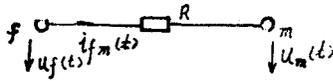


图 1-2 电容的特征线法等值电路

图 1-3 电阻的特征线法等值电路

3、电阻:

由于电阻不是储能元件, 因此不存在等值电流源, 所以等值电路如图 1-3 所示, 其表达式为

$$i_{f_m}(t) = \frac{1}{R} [u_f(t) - u_m(t)] \quad (1-7)$$

二、分布参数电路的数学模型

以单相 (或单模) 输电线路为例, r 、 L 、 g 、 c 分别代表单位长度的电阻、电感、电导和电容值。线路上电压和电流是时间和距离的函数, 我们可以得到如下方程:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = ri + l \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = gu + c \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (2-1)$$

为便于求解, 可将 u 和 i 对时间 t 进行拉氏变换其表达式:

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = (r + pL) I - Li(x, 0) \\ -\frac{dI}{dx} = (g + pc) V - cV(x, 0) \end{cases} \quad (2-2)$$

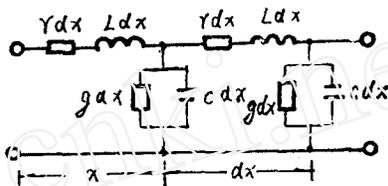


图 2-1 分布参数线路模型

从上式消去算子电流I, 得到电压V的方程式如下:

$$\frac{d^2U}{dx^2} - (r + pL)(g + pc)U = L \frac{di(x, 0)}{dx} - (r + pL)cU(x, 0) \quad (2-3)$$

先考虑无损线, $R = 0, g = 0$, 则

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \gamma^2 U \quad (2-4)$$

式(2-4)有如下形式的通解:

$$U = Fe^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} \quad (2-5)$$

$$\text{式(2-4)中和(2-5)中, } \gamma = \sqrt{Lcp} \quad (2-6)$$

γ 为传播常数。

从式(2-5)还可以得到

$$I = \frac{1}{Z} (Fe^{-\gamma x} - Be^{\gamma x}) \quad (2-7)$$

$$\text{上式中, } Z \text{为波阻抗 } Z = \sqrt{\frac{pL}{pc}} = \sqrt{\frac{L}{c}} \quad (2-8)$$

令故障点到保护安装处距离为d, 故障点为f, 末端为m, 线路上任意点电压U, 电流I都由前行波F和返行波B组成, 如图2-2所示。当故障发生在故障点即 $x = 0$ 时, 可求得:

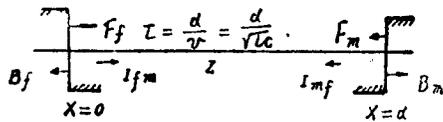


图2-2 波的传播过程

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} [U(o, p) + ZI(o, p)] \\ B = \frac{1}{2} [U(o, p) - ZI(o, p)] \end{cases} \quad (2-9)$$

在f处即 $x = 0$ 处, 还可得到前、返行波分别为:

$$\begin{cases} F_f = F = \frac{1}{2} [U(o, p) + ZI_{f,m}(o, p)] \\ B_f = B = \frac{1}{2} [U(o, p) - ZI_{f,m}(o, p)] \end{cases} \quad (2-10)$$

而在m处, 即 $x = d$ 处, 则有

$$U(d, p) = Fe^{-\gamma d} + Be^{\gamma d} = Fe^{-\gamma d} + Be^{\gamma d} \quad (2-11)$$

$$I_{m,f} = -I_{f,m} = -\frac{1}{Z} [Fe^{-\gamma d} - Be^{\gamma d}] = -\frac{1}{Z} [Fe^{-\gamma d} - Be^{\gamma d}] \quad (2-12)$$

从以上方程可得:

$$Be^{\gamma d} = \frac{1}{2} [U(d, p) + ZI_{m,f}] = F_m \quad (2-13)$$

$$Fe^{-\gamma d} = \frac{1}{2} [U(d, p) - ZI_{m,f}] = B_m \quad (2-14)$$

进而可得到线路上波的延续方程, 即

$$\begin{cases} B_f = F_m e^{-\gamma d} \\ B_m = F_f e^{-\gamma d} \end{cases} \quad (2-15)$$

于是结点f和m的电压电流方程如下:

$$U_f = U(o, p) = [U_m = ZI_{mf}] e^{-\gamma d} + ZI_{fm} \quad (2-16)$$

$$\text{同理: } U_m = U(d, p) = [U_f + ZI_{fm}] e^{-\gamma d} + ZI_{mf} \quad (2-17)$$

根据以上两式, 可得电流方程:

$$I_{fm} = \frac{U_f}{Z} - \frac{1}{Z} [U_m + ZI_{mf}] e^{-\gamma d} \quad (2-18)$$

$$I_{mf} = \frac{U_m}{Z} - \frac{1}{Z} [U_f + ZI_{fm}] e^{-\gamma d} \quad (2-19)$$

因为 $e^{-\gamma d} = e^{-\gamma \sqrt{LC}d}$, 又因为 $\sqrt{LC} = \frac{1}{V}$, V为波速, 所以 $e^{-\gamma d} = e^{-(d/V)P} = e^{-P\tau}$

根据拉氏变换理论, 若象函数

$$F(p) = F_1(p) e^{-T_0 P}$$

则其原函数为

$$f(t) = f_1(t - T_0) U(t - T_0)$$

其中 $U(t - T_0)$ 是单位函数, $f_1(t)$ 是 $F_1(p)$ 的原函数, 或者

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < T_0 \\ f_1(t - T_0) & t \geq T_0 \end{cases}$$

由Heaviside移位定理可以知道, $f(t)$ 和 $f_1(t)$ 在时间上相差 T_0 , $f(t)$ 是 $f_1(t)$ 的延迟函数, 经拉氏变换后, 可得如下形式:

$$u_f(t) = [U_m(t - \tau) + Zi_{mf}(t - \tau)] + Zi_{fm}(t) \quad (2-20)$$

$$u_m(t) = [U_f(t - \tau) + Zi_{fm}(t - \tau)] + Zi_{mf}(t) \quad (2-21)$$

所以:

$$i_{fm}(t) = \frac{U_f(t)}{Z} - \frac{1}{Z} [U_m(t - \tau) + Zi_{mf}(t - \tau)] \quad (2-22)$$

$$i_{mf}(t) = \frac{U_m(t)}{Z} - \frac{1}{Z} [U_f(t - \tau) + Zi_{fm}(t - \tau)] \quad (2-23)$$

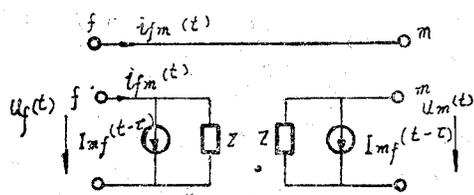


图2-3分布参数线路特征线法等值电路

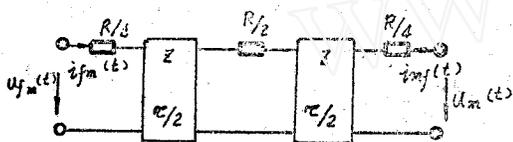


图2-4 有损线路的处理

按照以上两式, 可得到输电线路的等值电路如图2-3所示。

事实上, 线路一般均有损耗, 通常将全线电阻均匀地插入中间和两端⁽¹⁾如图2-4所示。图中R为全线总电阻, τ 为波行时间, 令

$$h = \frac{Z - 0.25R}{Z + 0.25R} \quad (2-24)$$

则不难得到:

$$I_{m_f}(t-\tau) = \frac{1+h}{2} [-u_f(t-\tau)/z - i_{f_m}(t-\tau)] + \frac{1-h}{2} [u_m(t-\tau)/z - i_{m_f}(t-\tau)] \quad (2-25)$$

$$I_{f_m}(t-\tau) = \frac{1+h}{2} [-u_m(t-\tau)/z - i_{m_f}(t-\tau)] + \frac{1-h}{2} [u_f(t-\tau)/z - i_{f_m}(t-\tau)] \quad (2-26)$$

三、单相(模)系统的计算步骤:

籍助于上述原理,对于只能用分布参数表示的500kV输电线路的故障暂态,可先计算 $t=0$ 时刻(故障点加上故障分量时作为时间起点)的变量,然后依次计算 $t=\Delta t$, $t=2\Delta t$ ……直到所考察的时刻的各变量。在某一时刻 t 时的计算次序如下:

(1) 根据时刻 t 以前的计算结果,求得各等值电流源 $I(t-\tau)$ 和 $I(t-\Delta t)$ 。

(2) 计算时刻 t 时各结点电压 $u(t)$,其中 $u_f(t)$ 即故障点的故障分量电压为已知量,若令故障结点的故障分量为 $u_1(t)$,因 $I(t-\tau)$ 和 $I(t-\Delta t)$ 诸量已由(1)求得,故 $u_2(t), u_3(t) \dots u_m(t)$ 可由

$$[u(t)] = [Y]^{-1} \{ [i(t)] - [I(<t)] \} \quad (3-1)$$

算出。式(3-1)系由多结点网络的特征线等值网络的结点方程:

$$[Y] [u(t)] = [i(t)] - [I(<t)] \quad (3-2)$$

导出。式(3-2)中:

$[Y]$ 为特征线法等值网络的结点电导矩阵。

$[u(t)]$ 为结点电压矩阵。

$[i(t)]$ 为结点电流矩阵。

$[I(<t)]$ 为根据时间 t 以前的电压电流值所决定的等值电流源矩阵。

(3) 计算时刻 t 时的各电流值 $i(t)$,因 $I(t-\tau), I(t-\Delta t)$ 和 $u(t)$ 已由(1)(2)求得,故 $i(t)$ 可由式(2-22)(2-23)算出。

(4) 计算时刻 t 时的各等值电流源 $I(t)$ 。因 $u(t)$ 和 $i(t)$ 已由(2)(3)求得,故 $I(t)$ 可由(2-25)和(2-26)算出。

四、三相系统的计算:

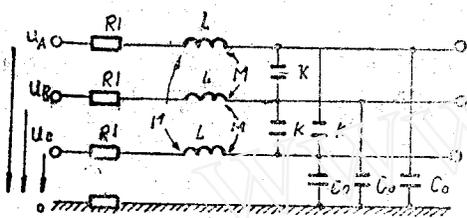


图4-1三相系统等值电路

在图4-1所示的一个三相系统中,

L, M 分别代表以地为回路时单位长度导线的自感与线间互感、 C_o, K 分别为单位长度导线对地与线间电容,这样,便可得到如下方程:

$$-\frac{\partial [u]}{\partial x} = ([R] + \frac{\partial}{\partial t} [L]) [i] \quad (4-1)$$

$$-\frac{\partial [i]}{\partial x} = (\frac{\partial}{\partial t} [C]) [u] \quad (4-2)$$

式(4-1) (4-2)中,

$$[u] = [u_a, u_b, u_c]^T \quad (4-3)$$

$$[i] = [i_a, i_b, i_c]^T \quad (4-4)$$

$$[R] = \begin{pmatrix} (R_1+R_g) & R_g & R_g \\ R_g & (R_1+R_g) & R_g \\ R_g & R_g & (R_1+R_g) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} R_0+2R_1 & R_0-R_1 & R_0-R_1 \\ R_0-R_1 & R_0+2R_1 & R_0-R_1 \\ R_0-R_1 & R_0-R_1 & R_0+2R_1 \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

其中 R_1 为正序电阻, $R_0 = R_1 + 3R_g$ 为零序电阻

$$[L] = \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} L_0+2L_1 & L_0-L_1 & L_0-L_1 \\ L_0-L_1 & L_0+2L_1 & L_0-L_1 \\ L_0-L_1 & L_0-L_1 & L_0+2L_1 \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

其中 $L_1 = L - M$ 为正序电感, $L_0 = L_1 + 2M$ 为零序电感。

$$[C] = \begin{pmatrix} C_0+2K & -K & -K \\ -K & C_0+2K & -K \\ -K & -K & C_0+2K \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} C_0+2C_1 & C_0-C_1 & C_0-C_1 \\ C_0-C_1 & C_0+2C_1 & C_0-C_1 \\ C_0-C_1 & C_0-C_1 & C_0+2C_1 \end{pmatrix} \quad (4-7)$$

其中 $C_1 = C_0 + 3K$ 为正序电容, $C_0 = C_0$ 为零序电容。在作拉氏变换时, 令

$$L[u(x, t)] = [V(x, p)] = [V] \quad (4-8)$$

$$L[i(x, t)] = [I(x, p)] = [I] \quad (4-9)$$

当线路初始条件为零时, 即故障分量电压和故障分量电流为零时, 式(4-8)和(4-9)可写成:

$$-\frac{d}{dx} [V] = ([R] + p [L]) [I] \quad (4-10)$$

$$-\frac{d}{dx} [I] = p [C] [V] \quad (4-11)$$

经适当变换后, 可以得到:

$$\frac{d^2}{dx^2} [V] = [\lambda^2] [V] \quad (4-12)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} [I] = [\lambda^2] [I] \quad (4-13)$$

仿照式(4-14)和式(4-15), 可依次写出B相和C相的电压、电流方程, 但由于相间的电磁耦合, 电感矩阵 $[L]$ 和电容矩阵 $[C]$ 都不是对角矩阵, 因而波在三相系统中的传播, 就不再是相互独立进行的。直接求解(4-12)和(4-13)将不胜其繁, 故可采用坐标变换即模变换的方法来进行分析计算。在数学处理上, 就是要使(4-12)和(4-13)中的 $[\lambda^2]$ 成为对角矩阵。

令电压和电流的模量的列向量由(4-14)、(4-15)表示。

$$[U_m] = [U_0, U_a, U_b]^T \quad (4-14)$$

$$[I_m] = [i_0, i_a, i_b]^T \quad (4-15)$$

令电压和电流的相量的列向量由(4-16)和(4-17)表示:

$$[U_p] = [U_a, U_b, U_c]^T \quad (4-16)$$

$$[I_p] = [I_a, I_b, I_c]^T \quad (4-17)$$

则它们的变换关系为:

$$[U_p] = [T] [U_m] \quad (4-18)$$

$$[I_p] = [T] [I_m] \quad (4-19)$$

式(4-18)和(4-19)中, [T] 是转换矩阵, 将式(4-18)、(4-19)代入式(4-12)和(4-13)中, 经运算后可得:

$$\frac{d^2}{dx^2} [U_m] = [T]^{-1} [\lambda^2] [T] [U_m] \quad (4-20)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} [I_m] = [T]^{-1} [\lambda^2] [T] [I_m] \quad (4-21)$$

为使式(4-20)和(4-21)中的 $[T]^{-1} [\lambda^2] [T] = [\gamma^2]$ 为对角矩阵, 应在求出 $[\lambda^2]$ 的特征根后再求出对应于每一特征值的特征向量, 最后将所得的三组特征向量作为 [T] 的三个列向量。用 $[T]^{-1} [\lambda^2] [T]$ 进行运算后就可获得 对角线矩阵 $[\gamma^2]$, 可以看出 $[\gamma^2]$ 的三个对角元素即为 $[\lambda^2]$ 的三个特征值。经过运算后可求得 $[\gamma^2]$ 和 $[Z_m]$ 如下:

$$[\gamma^2] = [T^{-1}] [\lambda^2] [T] \quad (4-22)$$

$$[\gamma^2] = \begin{pmatrix} \gamma_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_a^2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_b^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_0 + pL_0)pc_0 & 0 & 0 \\ 0 & (R_1 + pL_1)pc & 0 \\ 0 & 0 & (R_1 + pL_1)pc_1 \end{pmatrix} \quad (4-23)$$

而

$$[Z_m] = \begin{pmatrix} \frac{R_0 + pL_0}{\gamma_0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_1 + pL_1}{\gamma_a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_1 + pL_1}{\gamma_b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \sqrt{L_0/c_0} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{L_1/c_1} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{L_1/c_1} \end{pmatrix} \quad (4-24)$$

式(4-24)中, γ 采用了近似式, 实际上按级数展开后应得:

$$\gamma_a = \gamma_b = [(R_1 + pL_1)pc_1]^{1/2} \approx \frac{p}{v_1} + \frac{R_1}{2v_1L_1} = \gamma_1 \quad (4-25)$$

$$\gamma_0 = \frac{p}{v_0} + \frac{R_0}{2v_0L_0} \quad (4-26)$$

$$\text{其中 } v_1 = 1/\sqrt{L^1C_1} \quad (4-27)$$

$$v_0 = 1/\sqrt{L^0C_0} \quad (4-28)$$

经变换后的模分量与原来相分量之间的关系是:

$$\begin{cases} V_a(x, p) = \frac{1}{3} [V_A(x, p) - V_B(x, p)] \\ V_b(x, p) = \frac{1}{3} [V_A(x, p) - V_C(x, p)] \\ V_0(x, p) = \frac{1}{3} [V_A(x, p) + V_B(x, p) + V_C(x, p)] \end{cases} \quad (4-29)$$

这样就可以得到

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} V_\alpha(x, p) = \gamma_\alpha^2 V_\alpha(x, p) \\ \frac{d^2}{dx^2} V_\beta(x, p) = \gamma_\beta^2 V_\beta(x, p) \\ \frac{d}{dx} V_0(x, p) = \gamma_0 V_0(x, p) \end{cases} \quad (4-30)$$

按照单相求解的方法, 上式 α 分量就可写成

$$V_\alpha = F_\alpha e^{-\gamma_\alpha x} + B_\alpha e^{\gamma_\alpha x} \quad (4-31)$$

上式中 F_α 和 B_α 可按边界条件定出, 当导线包括导线电阻时, 则要考虑波在传播过程中的衰减

γ_α 按式(4-25)取值, 则

$$e^{-\gamma_\alpha x} = e^{-\frac{1}{\sqrt{r}} \left(p + \frac{R_1}{2L_1} \right) x} = e^{-\frac{x}{\sqrt{r} l} p} \cdot e^{-\frac{R_1}{2Z_1} x} = e^{-\tau p} \cdot e^{-\frac{R_1}{2Z_1} x} \quad (4-32)$$

上式中第一项表示波在导线上传播时从故障点到保护测量点的延迟, 第二项表示波副值的衰减。按照单相变换的方法, 不难求出线路两端 f 、 m 的电压和电流如下:

$$i_{fm\alpha}(t) = \frac{1}{Z_1} u_{f\alpha}(t) + I_{f\alpha}(t-\tau) \quad (4-33)$$

$$i_{mf\alpha}(t) = \frac{1}{Z_1} u_{m\alpha}(t) + I_{m\alpha}(t-\tau) \quad (4-34)$$

其中

$$I_{f\alpha}(t-\tau) = \frac{-1}{Z_1} e^{-\frac{R_1}{2Z_1} d} [u_{m\alpha}(t-\tau) + Z_1 i_{mf\alpha}(t-\tau)] \quad (4-35)$$

$$I_{m\alpha}(t-\tau) = \frac{-1}{Z_1} e^{-\frac{R_1}{2Z_1} d} [u_{f\alpha}(t-\tau) + Z_1 i_{fm\alpha}(t-\tau)] \quad (4-36)$$

此外, 还可将(4-33)、(4-34)改写成电压表达式:

$$u_{f\alpha}(t) = Z_1 i_{fm\alpha}(t) - Z_1 I_{f\alpha}(t-\tau) \quad (4-37)$$

$$u_{m\alpha}(t) = Z_1 i_{mf\alpha}(t) - Z_1 I_{m\alpha}(t-\tau) \quad (4-38)$$

若将上述式(4-31)~(4-38)诸式的下标 α 分别换成 β 和0, Z_1 分别相应地换成 Z_1 和 Z_0 , 不难得到 β 和0分量的计算公式。

根据以上分析, 可先将故障的系统中按边界条件确定故障电源, 然后将该故障电源分解成 α 、 β 和0三个分量系统, 对每个模逐一进行计算后, 再将三个分量通过相—模反变换合成为三个相量, 这样就可以求得所需的解。

五、简化潮流计算

故障后的系统, 诸线路的电流和诸结点的电压, 可根据以下公式算出:

$$P_{af} = P_{fa} + P_{ff} \quad (5-1)$$

式中, P_{af} ——故障后分量, 即全分量。

P_{fa} ——故障分量

P_{ff} ——故障前分量

在本计算中,故障前诸结点的电压都作为已知量给出,因而线路在故障前的电流,则按

下式算出: [2]

$$E_K = E_K \sin(\omega t + \varphi_K) \quad (5-2)$$

$$E_M = E_M \sin(\omega t + \varphi_M) \quad (5-3)$$

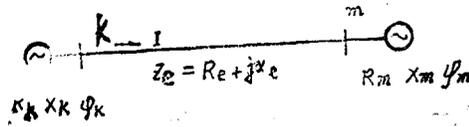


图5-1 简化潮流计算等值图

$$\text{则 } \dot{I} = \frac{\dot{E}_K - \dot{E}_M}{Z_\Sigma}$$

$$I = \frac{E_K}{Z_\Sigma} \sin(\omega t + \varphi_K - \varphi_\Sigma) - \frac{\rho E_M}{Z_\Sigma} \sin(\omega t - \varphi_M - \delta) \quad (5-4)$$

式中: $\rho = E_K/E_M$

电压幅值比

$$\delta = \varphi_K - \varphi_M$$

电源初始相角差

$$Z_\Sigma = Z_k + Z_m + Z_L = Z_\Sigma e^{j\varphi_\Sigma}$$

综合阻抗

$$\varphi_\Sigma = \tan^{-1} \frac{X_k + X_m + X_L}{R_k + R_m + R_L}$$

综合阻抗角

$$Z_\Sigma = \sqrt{(R_k + R_m + R_L)^2 + (X_k + X_m + X_L)^2} \quad \text{综合阻抗幅值}$$

六、复故障计算:

复故障最常见的方式,系由短路和断线两种故障类型组成。本程序主要采用迭加的方法来综合这两种类型的故障,考虑到短路和断线所呈现的 α 、 β 、0诸量,其意义并不一样,因而采用了转角变压器原理来实现两种故障的综合。

0, 1, 2系统中采用转角变压器的原理的计算,已有文献可资参考。因而可用0, 1, 2系统中的有关方法,来实现0、 α 、 β 系统的转角,不难导出:

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{6}(3+j\sqrt{3}) & \frac{1}{6}(3-j\sqrt{3}) \\ 0 & \frac{1}{6}(3-j\sqrt{3}) & \frac{1}{6}(3+j\sqrt{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

或

$$\begin{cases} V_0 = V_0 \\ V_\alpha = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) + j\frac{\sqrt{3}}{6}(V_1 - V_2) \\ V_\beta = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) - j\frac{\sqrt{3}}{6}(V_1 - V_2) \end{cases} \quad (6-2)$$

还可以导出:

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a & -a^2 \\ 0 & -a^2 & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

或

$$\begin{cases} V_0 = V_0 \\ V_1 = -aV_a - a^2V_b = \frac{1}{2}(V_a + V_b) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_a - V_b) \\ V_2 = -a^2V_a - aV_b = \frac{1}{2}(V_a + V_b) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_a - V_b) \end{cases} \quad (6-4)$$

式中 $a = e^{j120^\circ}$

对于不同类型的串一串型、串一并型及混合型故障的处理方法大体相同，唯一需要指出的是 V_1 、 V_2 及 V_0 的转换，是由模量中 V_a 、 V_b 及 V_0 的转换来实现的。

七、程序设计

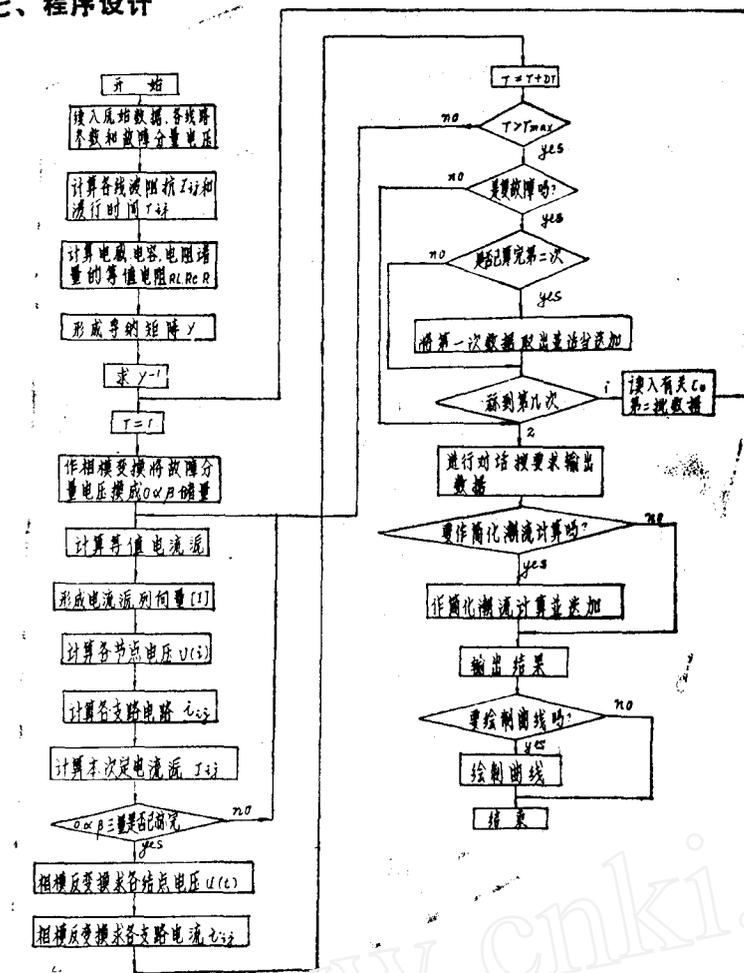


图1—6 故障暂态计算程序框图

根据以上分析，本文设计了一套计算程序，其框图如图6—1所示。

在目前可见到的文献中，故障分量的输入方式种类较多，但一个共同的特点是需要反复迭代计算，这种处理方法占用内存容量较大而且耗费时间。本文采取了直接输入的

方式，即将从理论分析得到的故障分量首先分解成三个模分量，然后逐模进行计算，这样，既能使精度满足要求，又可设计一个通用的程序反复调用，从而达到节约机时的目的。

八、计算结果与试验结果对比

依据本文所设计的程序，已用FORTRAN语言在PRIME机上调试通过，可用于计算20结点的500kV电力系统30mS以内的故障暂态过程。这套程序可用于计算简单故障和复故障，可按照需要输出任意结点的各相故障分量电压和支路的故障分量电流及零序电压和零序电流；按需要既可输出曲线又可输出数据或者同时输出两者，图7—1~7—4给出了几个典型的计算结果。图中实线表示计算结果，虚线表示试验结果。

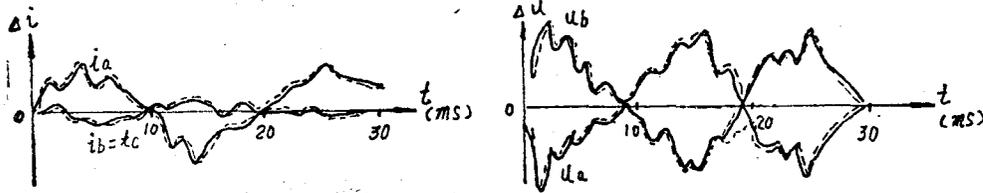


图7—1 A相单相接地时各相故障分量电流 图7—2 AB两相短路时各相故障分量电压

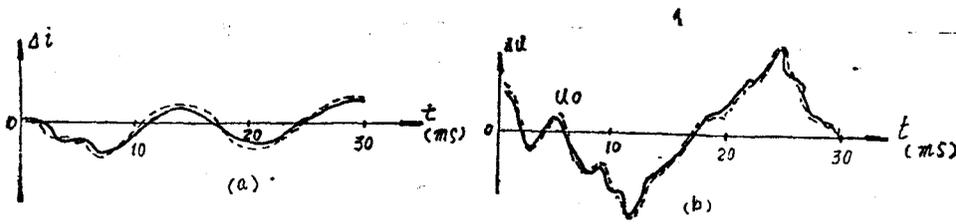


图7—3 (a) AB两相接地短路时的零序电流
(b) AB两相接地短路时的零序电压

九、结论：

- 1、运用特征线法计算简单故障的故障分量的方法，作适当处理后，可用来计算各种类型的复故障。
- 2、按模分量读入各种故障，可以节约机时。

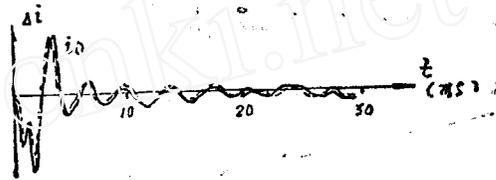


图7—4 本侧AB相接地短路对侧跳开三相后本侧的零序电流

(下转29页)

$$\begin{pmatrix} v_{pp} \\ v_{pa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{ij} & Z_{ij-pa} \\ Z_{pa-ij} & Z_{pa-pa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1-Y) + I_i \\ I_{pa} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (27)$$

由(27)式可得

$$\begin{pmatrix} 1-Y + I_i \\ I_{pa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{ij} & y_{ij-pa} \\ y_{pa-ij} & y_{pa-pa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ij} \\ v_{pa} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (28)$$

$$= \begin{pmatrix} y_{ij} & y_{ij-pa} \\ y_{pa-ij} & y_{pa-pa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{ki} - Z_{kj} \\ Z_{kp} - Z_{ka} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (28)$$

从(28)式就可求得 I_i 、 I_{pa} 的电流值。同样也不难求出 I_j 及其它支路电流,这里不再论述。有兴趣的同志可参阅文献^[1]。

五、结论

本文对互感的断开、挂检进行了详尽的分析推导,有效地把追加互感支路问题转化成对一般支路的追加。本方法简单、新颖。

(本文经华中工学院言昭副教授审阅,在此致谢。)

参考文献

- [1] 电力系统接地故障点的分析计算方法 王广学
- [2] 电力系统复故障的一般分析方法 韩贞祥
- [3] 电力系统故障分析 华北电力学院 刘万顺等编

(上接11页)

十、参考文献

1. H.W.Dowmel

《Digital computer Solution of electromagnetic transient in single and multiphase networks》

IEEE Trans Vol PAS-88 April 1969

2. 朱声石:《高压电网继电保护原理与技术》 电力工业出版社 1981·3
3. 重庆大学、南京工学院合编 《高电压技术》 电力工业出版社 1981·2