

低频分量对方向阻抗继电器暂态特性的影响

杭州市电力局 马益民

超高压输电线路装设串联补偿电容器以后给系统的距离保护动作的选择性带来了很大的影响。因而对距离保护装置采取了一系列防止不正确动作的措施，这些措施经十多年来的运行考验证明都是成功的。随着新型的快速动作的晶体管距离保护的应用，有必要研究串补系统暂态过程对晶体管方向阻抗继电器动作行为的影响。本文着重介绍串补系统的低频分量对晶体管方向阻抗继电器的暂态特性的影响。

一、问题的提出

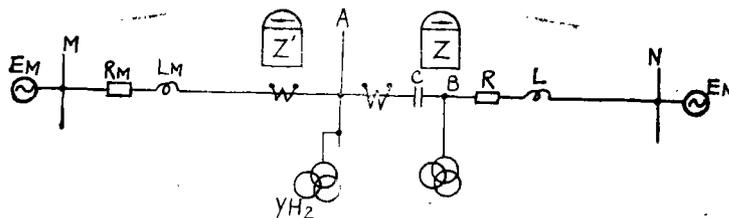


图1 系统接线示意图

在图1所示的系统中，串补站装设在线路AN的出口处，线路AN距离保护装置于串联电容出口处B点，其电压回路使用线路压变YH₁，动作方向指向N侧；方向阻抗继电器Z'为变电所母线A上相邻线路的距离保护，其电压回路使用母线压变，动作方向指向各自的线路（图中Z'的动作方向为指向M侧）。

方向阻抗继电器Z的静态特性园（如图2—*a*实线所示，Z'的静态特性园如图2—*b*）实线所示由于容抗的存在，他们都可能在各自反方向短路时发生误动作。如当在串补线路AN上相当于容抗值X_c的线路范围内K₁点发生短路时，Z能正确动作，Z'因背后感受容抗X_c落在静态特性园内而误动作。

方向阻抗继电器Z的动态特性园如图2—*a*）虚线所示。由图可见，正向阻抗继电器Z的静态特性园包含在动态特性园内，继电器感受阻抗从故障瞬间起，即处于动态特性园内，因而能瞬时动作；Z'的动态特性园如图2—*b*）虚线所示。对反向阻抗继电器Z'来说，故障点K₁首先落在其动态特性园外，继电器开始不动作，随着极化电压相

位由故障前的相位，逐渐衰减到继电器端子上残余电压的相位，即由动态特性园过渡到静态特性园后，继电器开始动作，因而 Z' 具有延时动作特性。

上述对方向阻抗继电器静态及动态特性的论述都是假设在理想情况下，即：(1)保护安装点的残压 \dot{U}_v 和流经保护安装点的短路电流 \dot{I}_K ，只计及工频分量而没有考虑暂态过程中的非周期分量的影响。计算表明，在串联补偿系统中发生短路时，暂态量中低频分量是很可观的。(2)阻抗继电器的极化回路的衰减时间常数为相对无穷大，在故障瞬间极化电压保持故障前的数值和相位。以后再逐渐衰减到故障以后的数值和相位。在这个衰减过程中在低频分量的作用下继电器的动作行为如何呢？这就是本文着重介绍的问题。

现以杭州市电力局在有关单位协助下研制成功的“晶体管双重圆反向闭锁装置”中采用的方向阻抗继电器为例来进行分析。该方向阻抗继电器的是由原JJ-11A型方向阻抗继电器改制而成的按相灵敏结线的原理构成，其动作方程式为：

$$\left| \dot{U}_r - (\dot{U}_v - \dot{I} Z_Y) \right| \geq \left| \dot{U}_r + (\dot{U}_v - \dot{I} Z_Y) \right| \dots\dots\dots (1)$$

式中 \dot{U}_r ——继电器安装点的电压

\dot{I} ——流经继电器安装点的故障电流

\dot{U}_r ——继电器的极化电压（与JJ-11A一样，仍取第三相电压为极化电压）

Z_Y ——继电器的整定阻抗。

晶体管方向阻抗继电器的原理接线图及参数如附录1所示。

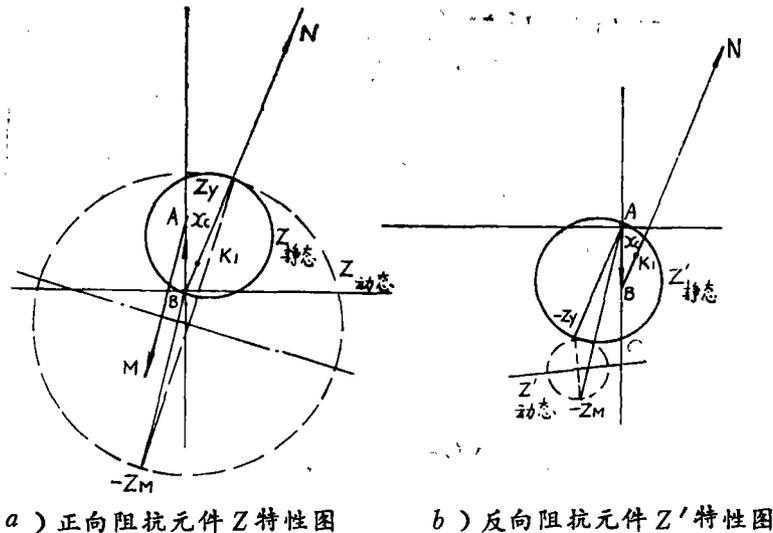


图2 方向阻抗继电器动作特性图

二、一次系统电磁暂态过程的计算

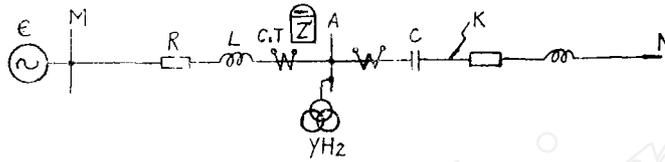


图3 具有串联补偿输电线路模拟系统图

模拟系统回路参数如下:

e —等效系统电势 $e = E_m \sin(\omega t + \theta)$

式中 $E_m = 1970\sqrt{2}$

$\omega = 2\pi f = 314$ $f = 50 \text{ H Z}$

θ — $t \rightarrow 0$ 时电势的初相角

R —模拟线路等值电阻 $R = 26 \Omega$

L —模拟线路的等值电感 $L = 0.573 \text{ h}$ $X_L = 180 \Omega$

C —模拟线路的串联电容器 $C = 77.7 \mu\text{f}$ $X_C = 41 \Omega$

$YH2$ —模拟结线的电压互感器变比 $n_v = \frac{57 \text{ V}}{1070 \text{ V}}$

$C \cdot T$ —模拟结线的电流互感器变比 $n_i = \frac{5 \text{ A}}{3.4 \text{ A}}$

K_1 —模拟串联电容出口处发生三相短路点

串补线路发生三相短路, 如果忽略输电线路的分布电容, 可以将系统简化为 $R-L-C$ 集中参数, 这样, 故障电流可以用经典法解微分方程求取。

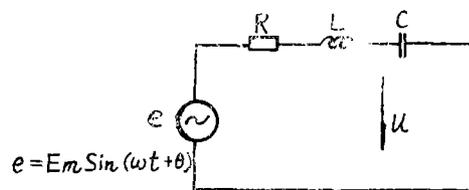


图4 计算系统等效电路

$$i = C \frac{d u}{d t} \quad L C \frac{d^2 u}{d t^2} + R C \frac{d u}{d t} + u = E_m \sin(\omega t + \theta) \dots \dots \dots (2)$$

在一般串补线路中, 上述微分方程的特征方程是二个共轭复根, 其通解为:

$$u = u_s + u_t = \frac{E_m}{Z} X_C \sin(\omega t + \theta - \phi - \frac{\pi}{2}) + A e^{-bt} \sin(\omega_0 t + X) \dots \dots \dots (3)$$

$$i = i_s + i_t = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \theta - \phi) C A e^{-bt} [-b \sin(\omega_0 t + \alpha) + \omega_0 \sin(\omega_0 t + \alpha)] \dots \dots \dots (4)$$

式中 $A \cdot X$ 是由初始条件决定的积分常数

$$Z \text{—回路阻抗的模 } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{26^2 + (180 - 41)^2} = 141 \Omega$$

$$\varphi \text{—回路阻抗的幅角 } \varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{180 - 41}{26} = 79.4^\circ$$

$$b \text{—自由分量的衰减系数 } b = \frac{R}{2L} = \frac{26}{2 \times 0.573} = 22.7$$

$$\omega_0 \text{—自由分量的角速度 } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L^2} - \frac{R^2}{4L^2}} = 149$$

$$f_0 \text{—自由分量振荡频率 } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 23.8 \text{ Hz}$$

对于空载短路，故障前回路中的电流和串联电容器上的电压降为零。在此条件下，求得积分常数 A 和 X （参阅资料 1），将求得的 $A \cdot X$ 及系统参数代入（3）、（4）式，可得暂态电压及暂态电流为：

$$u = \frac{E_m}{Z \omega C} \sin(\omega t + \theta - \phi - \frac{\pi}{2}) + \frac{E_m C \cos(\theta - \phi)}{Z \omega C \cos \alpha} e^{-bt} \sin(\omega_0 t + \alpha) - \frac{E_m}{Z \omega_0 C} e^{-bt} \sin(\theta - \phi) \sin \omega_0 t \dots \dots \dots (5)$$

$$i = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \theta - \phi) - \frac{E_m C \cos(\theta - \phi)}{Z \omega \omega_0 L \cdot C} e^{-bt} \sin \omega_0 t + \frac{E_m \sin(\theta - \phi)}{Z \sin \alpha} \sin(\omega t - \alpha) \dots \dots \dots (6)$$

$$\text{式中 } \alpha = \arctg \frac{\omega_0}{b}$$

如果再假设 $R = 0$ 则 $\alpha \approx 90^\circ$ $\varphi \approx 90^\circ$

并且设 $K_c = \frac{X_C}{X_L}$ 即 K_c 为串补电容器的容抗与电源到故障点的等效线路电抗的比值

$$\therefore K_c = \frac{X_C}{X_L} = \frac{41}{180} = 0.228$$

$$\sqrt{K_c} = 0.477 \quad \frac{1}{\sqrt{K_c}} = \sqrt{\frac{X_L}{X_C}} = 2.1$$

显然 $\omega_0 = \omega \sqrt{K_c}$

这样（5）、（6）两式可简化为：

$$U = -\frac{E_m K_c}{Z} \sin(\omega t + \theta) + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} (\sin \theta \cos \omega_0 t + \frac{1}{\sqrt{K_c}} \cos \theta \sin \omega_0 t) \dots \dots \dots (7)$$

$$i = -\frac{E_m}{Z} \cos(\omega t + \theta) + \frac{E_m}{Z} e^{-bt} (\cos \theta \cos \omega_0 t - \sqrt{K_c} \sin \theta \sin \omega_0 t) \dots \dots \dots (8)$$

如果(7)、(8)两式是电源初相角为 θ 时的A相暂态电压与暂态电流,则B相与C相的暂态电压和暂态电流,列式如下:

$$U_a = -\frac{E_m X_c}{Z} \sin(\omega t + \theta) + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} (\sin\theta \cos\omega_0 t + \frac{1}{\sqrt{K_c}} \cos\theta \sin\omega_0 t) \dots\dots\dots (9)$$

$$U_b = -\frac{E_m X_c}{Z} \sin(\omega t + \theta - 120^\circ) + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} [\sin(\theta - 120^\circ) \cos\omega_0 t + \frac{1}{\sqrt{K_c}} \cos(\theta - 120^\circ) \sin\omega_0 t] \dots\dots\dots (10)$$

$$U_c = -\frac{E_m X_c}{Z} \sin(\omega t + \theta + 120^\circ) + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} [\sin(\theta + 120^\circ) \cos\omega_0 t + \frac{1}{\sqrt{K_c}} \cos(\theta + 120^\circ) \sin\omega_0 t] \dots\dots\dots (11)$$

$$i_a = -\frac{E_m}{Z} \cos(\omega t + \theta) + \frac{E_m}{Z} e^{-bt} (\cos\theta \cos\omega_0 t - \sqrt{K_c} \sin\theta \sin\omega_0 t) \dots\dots\dots (12)$$

$$i_b = -\frac{E_m}{Z} \cos(\omega t + \theta - 120^\circ) + \frac{E_m}{Z} e^{-bt} [\cos(\theta - 120^\circ) \cos\omega_0 t - \sqrt{K_c} \sin(\theta - 120^\circ) \sin\omega_0 t] \dots\dots\dots (13)$$

三、方向阻抗继电器 Z'_{AB} 暂态过程计算

如图3,当串联电容出口处K点发生三相短路时,母线侧相邻线路距离保护装置的方向阻抗继电器 Z' 的动作行为,现以 Z'_{AB} 为例来分析。

Z'_{AB} 电压回路接于母线电压 u_{AB} , 电流回路接入线路流变 $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, 方向指向被保护线路(图中系指向M侧)当AN线路上K点故障时,对 Z' 来说是反向,流经 Z'_{AB} 的电流为 $-(\dot{I}_A - \dot{I}_B)$ 。

1. u_Y 值的计算 (u_Y 为继电器端子上的工作电压 u_P 经 YH 以后送入比较回路的电压)

由(9)、(10)二式得

$$U_{ab} = U_a - U_b = -\frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z} \sin(\omega t + \theta + 30^\circ) + \frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z} e^{-bt} \sin(\theta + 30^\circ) \cos\omega_0 t + \frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z \sqrt{K_c}} e^{-bt} \cos(\theta + 30^\circ) \sin\omega_0 t \dots\dots\dots (14)$$

根据资料一的结论,对于单相暂态电压,当 $\theta = 0^\circ$ 时,暂态电压达最大值。同样可以推论,当 $\theta = -30^\circ$ 时,相间暂态电压也将达最大值,其最大暂态电压为:

$$U_{abmax} = -\frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z} \sin\omega t + \frac{\sqrt{3} E_m}{Z \sqrt{K_c}} X_c e^{-bt} \sin\omega_0 t \dots\dots\dots (15)$$

按模拟系统压变的变比，折算到 Z'_{AB} 端子上的工作电压 u_P 为：

$$U_P = -\frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z} n_V \sin \omega t + \frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z \sqrt{K_c}} n_V e^{-b't} \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (16)$$

阻抗继电器整定变压器 Y_H 的变比为 $\frac{n_z}{100}$ ，因此加到比较回路的电压 u_Y 值为：

$$U_Y = \frac{n_z}{100} U_P = -\frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z} n_V \cdot \frac{n_z}{100} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3} E_m X_c}{Z \sqrt{K_c}} n_V \frac{n_z}{100} e^{-b't} \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (17)$$

将参数代入以后得

$$U_Y = -40.5 \frac{n_z}{100} \sin 314t + 85 \frac{n_z}{100} e^{-22.7t} \sin 149t \dots\dots\dots (18)$$

(1) 若 YH 的抽头 $\frac{n_z}{100} = 50\%$ ，即方向阻抗继电器的整定阻抗为 $2\Omega/\phi$ ，则

$$U_Y^{(1)} = -20.25 \sin 314t + 42.5 e^{-22.7t} \sin 149t \dots\dots\dots (19)$$

图 5 画出了 $U_Y^{(1)}$ 的波形图，图中细实线表示故障后的工频残压的波形， $U_{Ys}^{(1)}$

$$= -20.25 \sin 314t$$

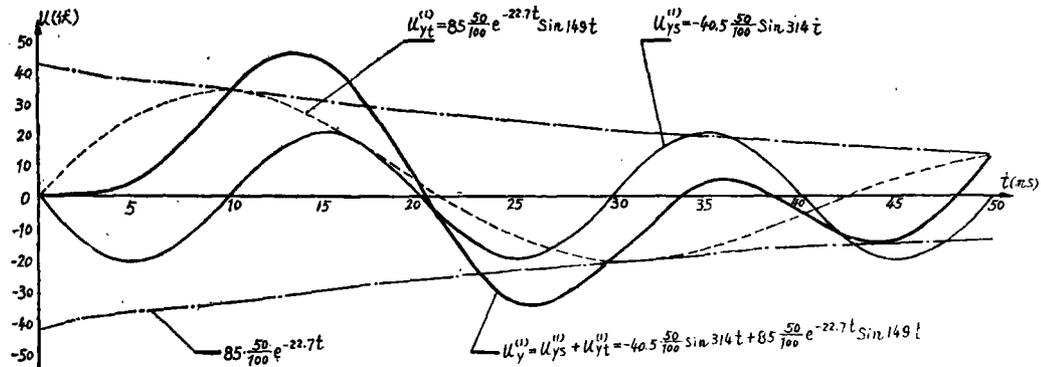


图 5 当 YB 抽头位置 50% 时 $u_Y^{(1)} = -20.25 \sin 314t + 42.5 e^{-22.7t} \sin 149t$ 的波形图

虚线表示低频自由分量的波形 $u_{yt}^{(1)} = 42.5 e^{-22.7t} \sin 149t$ 其周期以自由振荡频率 $f_0 = 23.8 \text{ Hz}$ 变化，其幅值以 $e^{-22.7t}$ 因子的关系衰减。图中点划线表示低频自由分量的衰减曲线 $42.5 e^{-22.7t}$ 。图中粗实线表示由工频残压与低频自由分量合成以后的暂态电压波形图。由图可知，由于低频自由分量的影响， u_Y 的波形（幅值与相位）发生了严重的畸变。

(2) 若 YH 的抽头 $\frac{n_z}{100} = 30\%$ ，即方向阻抗继电器的整定阻抗为 $3.3\Omega/\phi$ ，则

$$U_Y = -12.15 \sin 314t + 25.5 e^{-22.7t} \sin 149t \dots\dots\dots (20)$$

2. u_K 值的计算, (u_K 为故障电流 i_{ba} 产生的补偿阻抗电压)

由(12)、(13)式得流入 Z'_{AB} 元件的电流

$$i_{ba} = -i_{ab} = i_b - i_a = \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} \cos(\omega t + \theta + 30^\circ) - \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} e^{-bt} \cos(\theta + 30^\circ) \cos \omega_0 t + \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} e^{-bt} \sqrt{K_c} \sin(\theta + 30^\circ) \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (21)$$

同样令 $\theta = -30^\circ$, 得最大暂态电流

$$i_{ba \max} = \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} \cos \omega t - \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} e^{-bt} \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (22)$$

按模拟系统流变的变比 n_1 , 折算到流变二次侧的电流 i_p 为

$$i_p = n_1 i_{ba} = \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} n_1 \cos \omega t - \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} n_1 e^{-bt} \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (23)$$

阻抗继电器的电抗变压器 KH , 其一次电流可以认为全部为励磁电流, 其二次感应电压 $U_K = M \frac{d i}{d t}$

KH 的互感系数 M 是由 KH 本身的构造, 铁心及线圈参数所决定的, 电抗变压器的转移阻抗 $Z_0 = M \omega$ (ω - 工频角频率, 按 $f = 50\text{Hz}$ 设计故 $\omega = 314$), 对于本装置 $Z_0 = 1\Omega$, 则互感系数 M 在数值上为 $M = \frac{Z_0}{\omega} = \frac{1}{\omega}$, 若认为 M 是一个常数, 则暂态电流在 KH 二次侧感应的电压 U_K 为:

$$U_K = M \frac{d i_p}{d t} = -M \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} n_1 \omega \sin \omega t + M \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} n_1 b e^{-bt} \cos \omega_0 t + M \frac{\sqrt{3} E_m}{Z} n_1 \omega_0 e^{-bt} \sin \omega_0 t \dots\dots\dots (24)$$

将模拟系统参数代入, 并经化简后得:

$$U_K = -27.3 \sin 314t + 13.1 e^{-22 \cdot 7t} \sin(149t + 87^\circ) \dots\dots\dots (25)$$

图6画出了 u_K 的波形图, 图中细实线为故障电流的工频分量产生的补偿电压; u_{Ks}

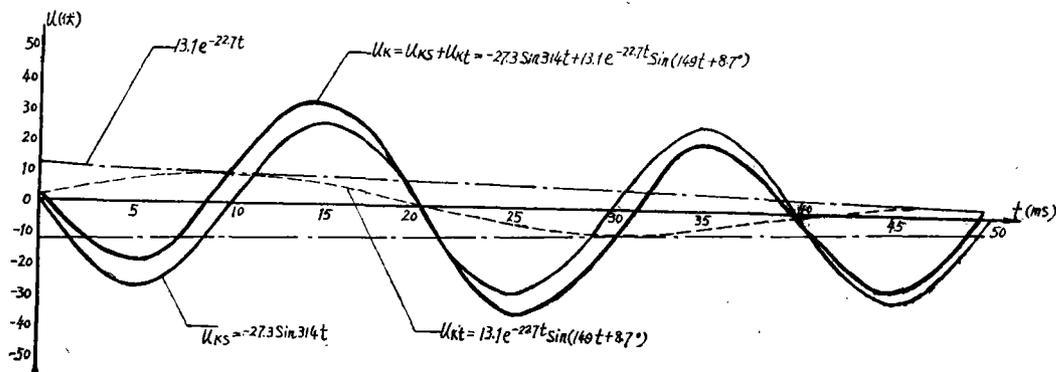


图6 $u_K = -27.3 \sin 314t + 13.1 e^{-22 \cdot 7t} \sin(149t + 87^\circ)$ 的波形图
 $= -27.3 \sin 314t$ 虚线表示低频电流自由分量产生的补偿电压波形 $U_{K1} = 13.1 e^{-22 \cdot 7t}$

$\sin(149t + 8.7^\circ)$ ，与 U_Y 的自由分量一样， u_{K1} 也是以其自由振荡频率 f_0 变化，同时以 $e^{-2.2 \cdot 7'}$ 因子的关系衰减。图中点划线表示低频自由分量幅值的衰减曲线 $-13.1e^{-2.2 \cdot 7'}$ ，图中粗实线表示工频暂态电流产生的补偿电压 u_{K5} 与低频自由分量产生的补偿电压 u_{K1} 合成后的暂态电压波形。

3. u_f 的计算

(1) 极化回路的接线及参数

极化变压器 $\omega_1 = 5000$ 匝 $W_2 = W_3 = 600$ 匝

III12 $\times 25$ $\delta = 2.5$ 当 $f = 50$ Hz 时

电感量 $L_f = 10.13$ h

极化变压的等值电阻 $r = 700 \Omega$

极化回路电容器 $C_f = 1 \mu f / 1000 V$

$R_f = R + r = 120 \Omega + 700 \Omega = 820 \Omega$

按上述参数，极化回路的固有振荡频率 $f_f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} = 50$ Hz

$\omega_f = 2\pi f_f = 314$

① 当 u_{co} 为工频电源频率时，极化回路所呈阻抗值为， $Z_f = R_f + j(\omega L - \frac{1}{\omega c})$
 $= |Z_f| e^{j\delta}$

$$|Z_f| = \sqrt{R_f^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega c})^2}$$

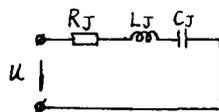
$$\delta = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega c}}{R_f}$$

当电源频率 f 等于谐振回路的固有振荡频率 f_f 时， $\delta = 0$ $Z_f = R_f = 820 \Omega$ 。

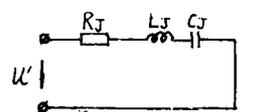
② 当 u_c 在低频电压如 $f_0 = 23.8$ Hz 的作用下，极化回路所呈的阻抗值为

$$Z_{fD} = R_f + j(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 c}) = |Z_{fD}| e^{j\delta_D} = 5220 \angle -81^\circ$$

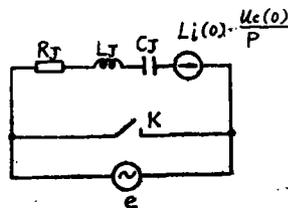
(2) 极化回路电流强制分量 i_s 的计算



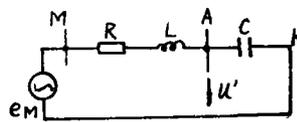
a) 故障前极化回路



b) 故障后极化回路



c) 拉氏变换运算图



d) K点三相短路，一次系统C相简化后的集中参数等效电路图

图 8

极化电压强制分量 u_{rs} 是由故障以后的第三相暂态电压 u_c 产生的, 由(11)式

$$U_c = -\frac{E_m X_c}{Z} \sin(\omega t + \theta + 120^\circ) + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} [\sin(\theta + 120^\circ) \cos \omega_0 t + \frac{1}{\sqrt{K_c}} \cos(\theta + 120^\circ) \sin \omega_0 t]$$

根据对 u_v 的分析, 当 $\theta = -30^\circ$ 时, 工作电压的暂态分量为最大值, 此时, 第三相电压为:

$$U_c = -\frac{E_m}{Z} X_c \cos \omega t + \frac{E_m}{Z} X_c e^{-bt} \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (28)$$

折算到压变二次侧的电压为

$$U_{cP} = -\frac{E_m X_c}{Z} n_v \cos \omega t + \frac{E_m X_c}{Z} n_v e^{-bt} \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (29)$$

上面已经谈到, 极化回路对工频电源所呈的阻抗为 $Z_I = |Z_I| e^{j\delta}$, 对低频电源所呈的阻抗为 $Z_{ID} = |Z_{ID}| e^{j\delta_D}$, 因此极化回路电流的强制分量 i_s 为工频电压 (u_{cP} 前面一项) 在极化回路中产生的极化电流 i_{s1} 和低频电压 (u_{cP} 第二项) 在极化回路中产生的极化电流 i_{s2} 的迭加, 即

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} = -\frac{E_m X_c}{Z |Z_I|} n_v \cos(\omega t - \delta) + \frac{E_m X_c}{Z |Z_{ID}|} n_v e^{-bt} \cos(\omega_0 t - \delta_D) \dots\dots\dots (30)$$

将模拟系统的实际参数代入, 得

$$i_s = -0.0285 \cos 314t + 0.00448 e^{-2.2 \cdot 7t} \cos(149t - 81^\circ) \dots\dots\dots (31)$$

(3) 极化回路电流自由分量 i_f 的计算

极化回路电流自由分量 i_f 是故障前第三相电压在极化回路中产生的(如图 8-a)

$$R_I i_f + L_I \frac{d i_f}{dt} + \frac{1}{C_I} \int i_f(t) dt = 0$$

经拉氏变换后得

$$R_I I(p) + L_I p I(p) - L_I i_f(0) + \frac{1}{p C_I} I(p) + \frac{u_{cI}(0)}{p} = 0$$

$$I(p) = \frac{L_I i_f(0) - u_{cI}(0)/p}{p L_I + \frac{1}{p C_I} + R_I} = \frac{p i_f(0) - u_{cI}(0)/L_I}{(p + \alpha)^2 + \omega_f^2}$$

经拉氏逆变换以后得:

$$i_f(t) = i_f(0) e^{-\alpha t} (\cos \omega_f t - \frac{\alpha}{\omega_f} \sin \omega_f t) - \frac{u_{cI}(0)}{L_I \omega_f} e^{-\alpha t} \sin \omega_f t \dots\dots\dots (32)$$

极化回路的初始条件为:

$$i_f(0) = \frac{\sqrt{2} U}{|Z_I|} \sin(\theta + 120^\circ - \delta)$$

$$u_{cI}(0) = \frac{\sqrt{2} U}{|Z_I|} X_{cI} \sin(\theta + 120^\circ - \delta - 90^\circ) = \frac{\sqrt{2} U}{|Z_I|} X_{cI} \sin(\theta - \delta + 30^\circ)$$



当 $\theta = -30^\circ$ 时

$$i_{(0)} = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_J|} \sin(90^\circ - \delta) = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_J|} \cos \delta \dots\dots\dots (33)$$

$$U_{c(0)} = -\frac{\sqrt{2}U}{|Z_J|} X_{cJ} \sin \delta \dots\dots\dots (34)$$

将(33)、(34)二式代入(32)式,取:

$$i_{(t)} = \frac{\sqrt{2}U}{|Z_J|} \cos \delta e^{-\alpha t} \left(\cos \omega_J t - \frac{\alpha}{\omega_J} \sin \omega_J t \right) + \frac{\sqrt{2}U X_{cJ}}{|Z_J| L_J \omega_J} e^{-\alpha t} \sin \delta \sin \omega_J t \dots\dots\dots (35)$$

式中 α —极化回路衰减系数 $\alpha = \frac{R_J}{2L_J} = \frac{82\Omega}{2 \times 10.15} = 40.5$

ω_J —极化回路固有振荡角频率 $\omega_J = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_J C_J}}$

U —故障前三相电压的有效值 $U = 57V$

θ 、 δ 、 Z_J 的意义同上,

设电源频率 $f = f_J$, 即 $Z_J = R_J$ 、 $\delta = 0$

则(35)式可写成

$$i_{(t)} = \frac{\sqrt{2}U}{R_J} e^{-\alpha t} \left(\cos \omega_J t - \frac{\alpha}{\omega_J} \sin \omega_J t \right)$$

将参数代入后得极化回路电流的自由分量 $i_{(t)}$ 为:

$$i_{(t)} = -0.0983 e^{-40.5t} \sin(314t - 82.6^\circ) = 0.0983 e^{-40.5t} \cos(314t + 7.4^\circ) \dots\dots\dots (36)$$

(4)极化电压 U_J 的计算

将式(31)与式(36)相加,得极化回路总电流为:

$$i = i_s + i_t = -0.0285 \cos 314t + 0.00448 e^{-22.7t} \sin(149t - 81^\circ) + 0.0983 e^{-40.5t} \cos(314t + 7.4^\circ) \dots\dots\dots (37)$$

设极化变压器的自感系数 L_J 是一个常数,则电感线圈的感应电势

$$U_{LJ} = L_J \frac{d i}{d t}, \text{将(37)式代入,经整理以后得:}$$

$$U_{LJ} = 90.8 \sin 314t - 6.84 e^{-22.7t} (149t - 72.3^\circ) - 314 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ) \dots\dots\dots (38)$$

设极化变压器是线性的,则其二次侧电压(即极化电压) $U_J = -n_J U_{LJ}$ $n_J = 0.12$,负号表示极性相反。

$$\therefore U_J = -n_J U_{LJ} = -10.9 \sin 314t + 0.82 e^{-22.7t} \sin(149t - 72.3^\circ) + 37.7 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ) \dots\dots\dots (39)$$

上式表明,极化电压 U_J 由三部分组成:

(1) $U_{J1} = 37.7 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ)$ 是故障前电压在极化回路中产生的自由分量。其振幅以 $e^{-40.5t}$ 因子的关系衰减。其变化角速度 ω , 由极化回路本身的参数决定。

(2) $U_{J2} = -10.9 \sin 314t$ 是故障以后工频残压产生的强制分量

(3) $U_{J3} = 0.82 e^{-22.7t} \sin(149t - 72.3^\circ)$ 是由一次系统暂态电压中的低频自由分量产生的极化电压, U_{J3} 以 $e^{-22.7t}$ 因子关系衰减, 衰减速度是由一次系统参数决定的, 其变化角速度也是由一次系统的参数决定的。由于极化回路的固有振荡频率为 ω_J , 因此对于低频 ω_0 呈现很高的阻抗, 故由低频分量产生的极化电压相对于 U_{J1} , U_{J2} 来讲是很少的。因此如果忽略 U_{J3} 不会带来多大的误差。因此可以将 U_J 近似表示为:

$$U_J = -10.9 \sin 314t + 37.7 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ)$$

图9示出 U_J 的波形图。图中细实线表示极化电压的强制分量, $U_{J2} = -10.9 \sin 314t$; 虚线表示极化电压的自由分量, $U_{J1} = 37.7 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ)$ 点划线表示 U_{J1} 幅值的衰减曲线 $37.7 e^{-40.5t}$, 粗实线表示由 U_{J2} 与 U_{J1} 合成以后的极化电压。从图中明显的看到, 故障开始时, U_{J2} 与 U_{J1} 几乎反相, 此时, U_J 与 U_{J1} 接近同相, 即极化电压与故障前的极化电压同相。随着 U_{J1} 的衰减, 使 U_J 的幅值逐渐减少到 E 点以后, U_J 开始与故障后残压所建立的极化电压 U_{J2} 同相, 即与故障前极化电压反相, 故 E 点称作极化电压的反相点。

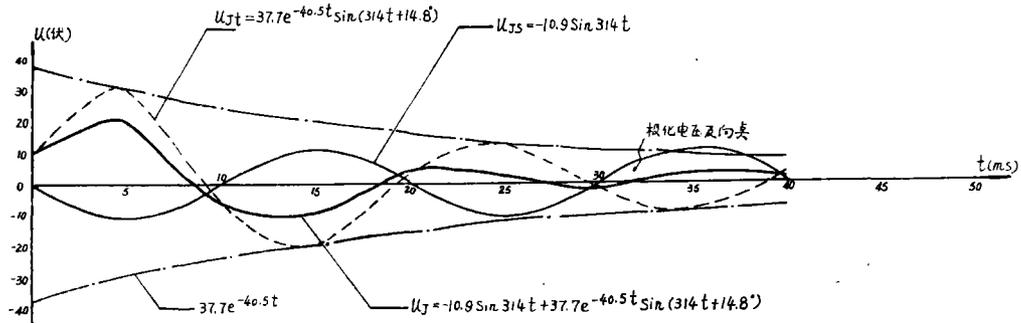


图9 极化电压 $U_J = -10.9 \sin 314t + 37.7 e^{-40.5t} \sin(314t + 14.8^\circ)$ 的波形图

四方向阻抗继电器 Z'_{AB} 动作状态的制定

根据方向阻抗继电器的动作原理, 其动作量为 $|U_J - (U_Y - U_K)|$, 制动量为 $|U_J + (U_Y - U_K)|$, 当 $|U_J - (U_Y - U_K)| \geq |U_J + (U_Y - U_K)|$ 时, 继电器动作, 反之则继电器制动。

(1)图10表示当Y B抽头位置50% (即继电器的整定阻抗为 $2\Omega/\phi$ 时)方向阻抗继电器动作量与制动量的波形图。图中细实线表示极化电压 U_J 的暂态波形,虚线表示动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 的波形,粗实线表示制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形。图中竖线阴影表示动作量大于制动量的区间,即继电器动作的区间;横线阴影表示制动量大于动作量的区间,即继电器的制动区间。从图中可以看到,继电器的动作情况分六个区域:

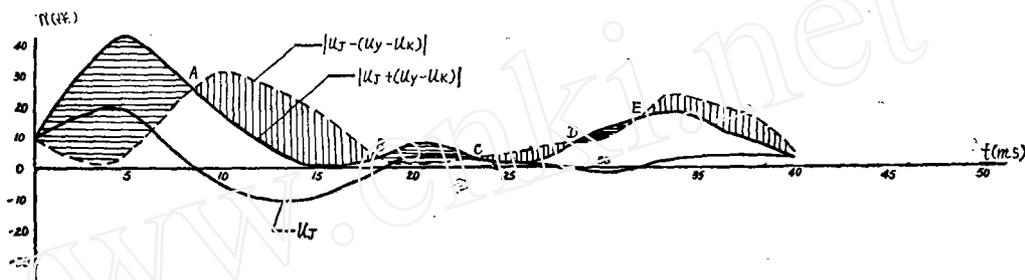


图10 Y B抽头50%时,方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 及制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形图

- ① O A区域(0~8.8ms之间)继电器制动
- ② A B区域(8.8ms~18.3ms之间),继电器第一次误抖动区,最大动作电压约20V,脉冲宽度约9.5ms
- ③ B C区域(18.3~23ms之间)继电器制动
- ④ C D区域(23ms~28ms之间)继电器第二次误抖动,最大动作电压约5V,脉冲宽度约5ms,可见第二次误抖动与第一次误抖动相比,幅值与宽度都要小得多。
- ⑤ D E区域(28ms~31.7ms)继电器制动
- ⑥ 极化电压 U_J ,至E点以后反相,继电器正常动作。

(2)图11表示Y B抽头30%位置时(即继电器的整定阻抗为 $3.3\Omega/\phi$)动作量与制动量的波形图图中可以看出,有二个误动作区域:

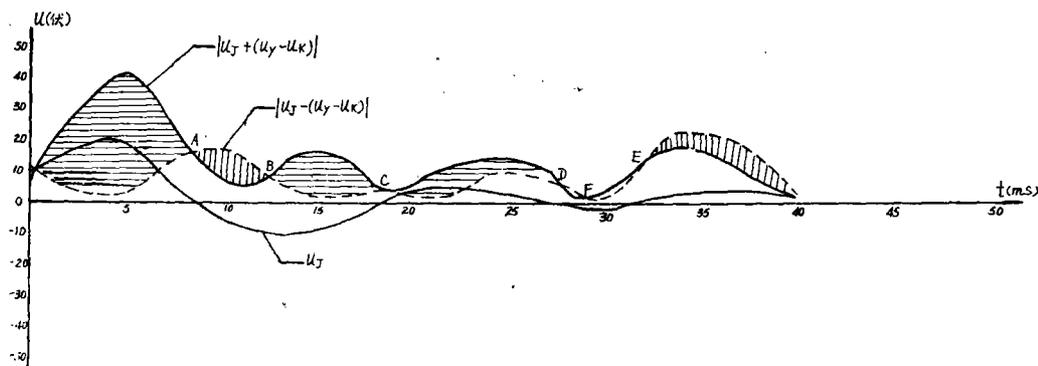


图11 Y B抽头30%时,方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 与制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形图

① AB 区域 ($8.8ms \sim 12.5ms$) 继电器第一次发生动作量大于制动量, 其最大动作电压约 $10V$ 脉冲宽度约为 $3.7ms$

② DF 区域: ($27.8 \sim 29.3ms$) 继电器第二次发生动作量大于制动量, 其最大动作电压约 $2V$, 脉冲宽度约为 $1.5ms$

由此可见, 当动作阻抗值增大以后, 误抖区大大缩小, 至 E 点极化电压反相以后, 继电器正常动作。

(3) 图12表示如果暂态电流及暂态电压中没有低频自由分量, 在只有工频分量 U_{ys} 、 U_{ks} 作用下, 方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 与制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形图, 从图中看到, 继电器不会发生误抖动, 当极化电压到 E 点反相以后继电器正常动作。

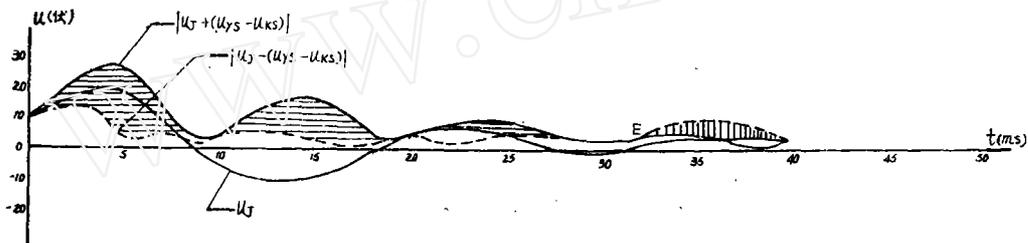


图12 如果暂态电流及暂态电压中没有低频分量, 在只有工频分量作用下方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 与制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形图

(4) 图13表示在系统暂态电压及暂态电压中的低频自由分量 U_{yt} 、 U_{kt} 的作用下, 方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_Y - U_K)|$ 与制动量 $|U_J + (U_Y - U_K)|$ 的波形图。继电器的动作情况与图10一样, 即

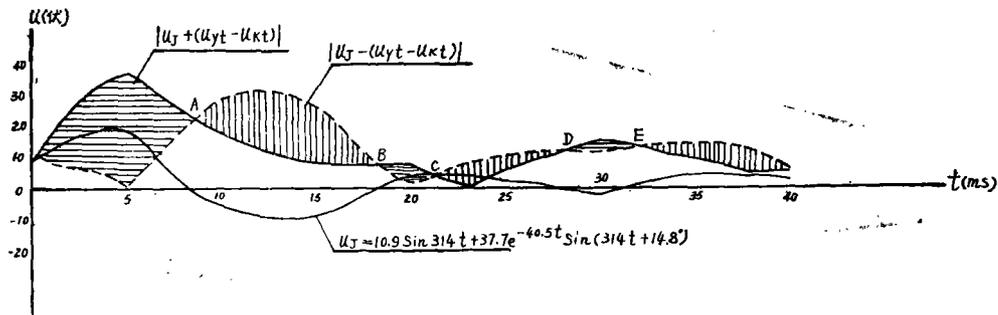


图13 在只有低频分量作用下, 方向阻抗继电器动作量 $|U_J - (U_{yt} - U_{kt})|$ 与制动量 $|U_J + (U_{yt} - U_{kt})|$ 的波形图

① OA 区域 ($0 \sim 8.5ms$) 继电器制动

② AB 区域 ($8.5 \sim 18.3ms$) 继电器第一次误抖区最大动作电压约 $20V$, 脉冲宽

度约为9.8ms

③ BC区域(18.3~21.3ms)继电器制动

④ CD区域(21.3~27ms)继电器第二次误抖动其最大动作电压约为7.5V,脉冲宽度约5.7ms

⑤ DE区域(27ms~31.7ms)继电器制动

⑥极化电压 U ,至E点以后反相,继电器正常动作

五、结 论

1.在具有串联补偿的电力系统发生短路时,暂态电流与暂态电压中有工频强制分量与低频自由分量。由于低频自由分量的存在,使暂态电流及暂态电压的波形发生严重的畸变。(幅值的变化及相位的位移。)

(1)低频自由分量的振荡频率 $f_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ 对于一定的系统,串联补偿电容 C 越大, f_0 越低;同样,对于一定的串联补偿电容量,随着系统运行方式的变化,从电源到短路点的系统综合阻抗越大, f_0 也越低。

(2)低频自由分量的衰减常数 $b = \frac{R}{2L}$ 是由线路的参数决定的,而与串联补偿电容量无关。

(3)由(16)式及(23)式可知,电压的低频自由分量可能比强制分量大许多倍,电流的低频自由分量的幅值与工频强制分量的幅值相差不大。

(4)短路瞬间电源电势的初相角 θ 对低频分量的幅值影响很大。对于工作于相间电压及相电流差的阻抗继电器,当 $\theta = -30^\circ$ 时, U_{ν} 及 U_{K} 均达最大值,而当 $\theta = 60^\circ$ 时 U_{ν} 及 U_{K} 为最小值。

(5)当串联补偿度增大时,电压及电流的强制分量与低频自由分量的幅值都将增大。

(6)当串联补偿电容量一定时随着系统运行方式的改变,从电源至短路点的系统综合阻抗越大,电压及电流的强制分量和低频自由分量的幅值都将减少。

2.由于暂态电流及暂态电压的波形严重畸变(幅值的变化及相位的位移),使在极化电压未反相以前就出现误抖动区,(见图11、10);如果暂态电压(电流)中没有低频自由分量,则在极化电压反相以前,继电器不会误抖动(见图12)待极化电压反相以后继电器才延时动作;如果在低频自由分量的作用下,继电器必然会发生误抖动(见图13)因此,串联补偿线路暂态电压(电流)中低频分量的存在是使反向阻抗继电器发生误抖动的根本原因。

3.从计算结果可以推测到,当故障点自串补站向线路侧移动时,低频分量将逐渐减少,反向阻抗继电器误动的可能性大大减少,而最小运行方式(此时电源至故障点的综合阻抗最大 $K_c = \frac{X_c}{L}$ 最小)出口故障时低频分量的影响最严重。

4. 综上所述, 由于低频分量的影响, 使具有插入电压的晶体管方向阻抗继电器发生误抖动, 且第一次误抖动发生在 $8 \sim 10 \text{ms}$ 之间。而感应型及整流型阻抗继电器动作时间都大于 20ms 可能反应不出来, 而对于快速的晶体管方向阻抗继电器是能反应的。因此, 这是串补系统采用晶体管距离保护必须注意的问题。并且有必要研究并且找出发生误抖动的措施, 为在串补系统采用快速的晶体管保护提供可靠的依据。目前, 我们在动模试验的基础上, 通过理论分析, 采取以下二项措施来防止反向阻抗继电器误抖动。

(1) 增加另指示器的动作时间以躲过第一次误抖动。适当增加零指示器抗干扰延时电容器 C_4 , 使另指示器的动作时间大于第一次误抖动的宽度 $A-B$ 区间, (如图10) 这样, 另指示器尚未来得及动作, 动作量已进入制动区, 另指示器被迫返回。因此继电器不会误抖动。从图10可以看到, 只要另指示器的动作时间大于 9.5ms 则可以使继电器不会发生误抖动。从试验结果看, C_4 从 $0.1 \mu\text{F}$ 增加到 $0.133 \mu\text{F}$ 可以防止第一次误抖动, 但此时, 正向动作时间将增加 $0.7 \sim 2 \text{ms}$ 。

(2) 适当增加继电器的整定阻抗值, 即减少 $\frac{n_t}{100}$ 值, 将大大减少误抖动区, (见图10和11) 当 YB 的抽头从 50% 减少到 30% 时, 第一次误抖动区最大动作电压从 20V 降为 10V , 脉冲宽度从 9.5ms 减少到 3.7ms ; 第二次误抖动区最大动作量从 5V 降为 2V , 脉冲宽度从 5ms 减少到 1.5ms 。

通过动模试验结果表明, 继电器整定阻抗裕度 $K_{ZY}/X_c \geq 2.23$ 时, 继电器不会产生误抖动。但是用增加继电器整定阻抗以减少误抖动区的方法, 对于闭锁装置似乎还可以, 而对于母线侧各线路的距离保护, Z_Y 显然是由本线的阻抗所决定的。不可能用增大整定阻抗的方法。

5. 对于不具有插入电压的晶体管方向阻抗继电器, 如 $JJ-11A$ 型距离保护中的方向阻抗继电器。其动作方程是: $|\dot{U}_I + \frac{1}{2} \dot{I} Z_Y| \geq |\dot{U}_I + \dot{U}_V - \frac{1}{2} \dot{I} Z_Y|$ 式中引入附加的第三相极化电压 \dot{U}_I , 只是为了消除出口三相短路时的死区, \dot{U}_I 的大小应保证不致改变动作方程的性质。因此这类继电器在串补线路上使用时, 正向故障与反向故障时, 继电器的动作时间大致相等, 即没有双重园特性。因而也就无所谓因低频分量的影响而误抖动的问题。但是, 这类继电器也不适用于串补线路或配合晶体管型正, 反向闭锁装置共同使用。

附录1. 晶体管方向阻抗继电器的原理接线图及参数

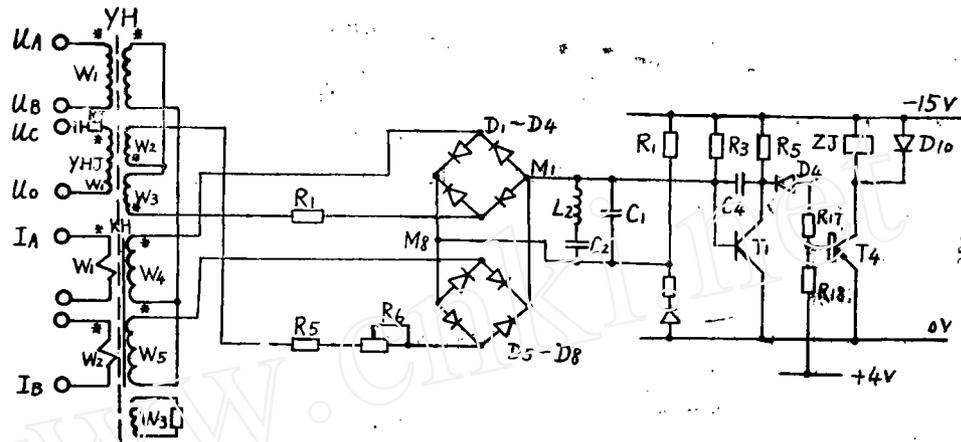


图14 晶体管方向阻抗继电器原理接线图

方向阻抗继电器的参数为:

1. 电抗互感器 KH $W_1 = W_2 = 2 + 6$ 匝 $W_3 = 720$ 匝 $W_4 = W_5 = 1150$ 匝,
II \square 12 \times 25铁心, 氧隙 $\delta = 2.5m/m$
 2. 整定电压互感器 YH , $W_1 = 1400$ 匝。
 $W_2 = 140 \times 9 + 28 \times 4 + 7 \times 3 = 1393$ 匝 II \square 15 \times 30铁心
 3. 极化变压器 YHJ , $W_1 = 5000$ 匝, $W_2 = W_3 = 600$ 匝
II \square 12 \times 25铁心, $\delta = 2.5m/m_1$, 电感量 $L_j = 10.13h$, (当 $f = 50Hz$)
 4. 交流回路电阻 $R_j = 120\Omega/4W$, $R_1 R_5 = 4.7K/10W$ $R_6 = 560\Omega$
 5. 电容器 $C_j = 1\mu f/1000V$
 6. 二极管 $D_1 \sim D_8$ DK-5
 7. 另指示器 D_1 2AP-7
- $D_4, D_{10} - 2CP-12$, $T_1 - 3AG32HJ$ T_4 3A \times 31G
 $ZJ - JAG-4H$ 干簧继电器
- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| $C_1 C_2 - 1\mu f/160V$ | $C_4 - 0.1 + 0.047\mu f$ |
| $R_1 R_5 - 240K/0.5W$ | $R_2 - 28K \frac{1}{2}W$ |
| $R_3 - 680K, \frac{1}{2}W$ | $R_{17} - 30K \frac{1}{2}W$ |
| $K_{18} - 51K, \frac{1}{2}W$ | |

附录2. 动模试验结果

动模试验的结果表明, 在具有串联补偿的电力系统中, 由于低频分量的影响, 反向阻抗元件确有可能产生误抖动, 现以一张典型的录波图 1* (图14) 为例, 分析如下:

试验条件：在图3所示接线及参数的模拟系统，模拟串联电容出口处三相短路，故障电流5A，故障电压8.52V，此时整定阻抗约为 2.5Ω （YB抽头位置41%）图中各线条意义如下：

- $I_A、I_B、I_C$ ——故障电流波形
- $Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CA}$ ——正向阻抗继电器另指示器 T_1 管电位波形
- $Z'_{AB}、Z'_{BC}、Z'_{CA}$ ——反向阻抗继电器另指示器 T_1 管电位波形
- 或1—— $Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CA}$ 另指示器经或门起动的中间继电器接点
- 或2—— $Z'_{AB}、Z'_{BC}、Z'_{CA}$ 另指示器经或门起动的中间继电器接点。

从图中可以看到

- (1)故障电流中含有较大的低频分量
- (2)正向阻抗元件 $Z_{AB}、Z_{BC}、Z_{CA}$ 故障后3ms动作，并且记忆70ms
- (3)反向阻抗元件 Z'_{AB} 没有发生误抖动，动作正确
- (4)反向阻抗元件 Z'_{BC} ，在故障后16ms发生第一次误抖动，至38ms处返回，至61ms处发生第二次误抖动。返回后再正常动作。
- (5)反向阻抗元件 Z'_{CA} 故障后13ms发生第一次误抖动，35ms处返回，至59ms处又发生第二次误抖动，至74ms处返回，以后才正常动作。
- (6)第一次误抖动时间较长，幅值较大，使“或2”动作，第二次误抖动幅值较小，“或2”没有动作，到极化电压反相以后才正常动作。

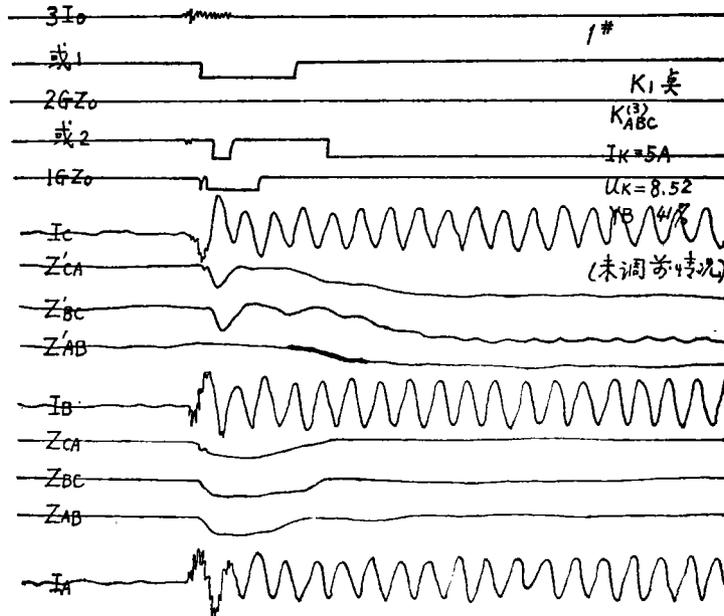


图15 1# 录波图

主要参考资料目录

- 1.新杭上串补工程短路过程计算报告
(水电部华东电力设计院 64、10)
- 2.电网的距离保护——继电保护学习班讲义第二篇。
(水电部华东电力设计院 77、5)

www.cnki.net