

电网的继电保护问题 (续)

东北技改局 北义

第三部分 一些与电网继电保护有关的系统问题

一、超高压网路的过渡过程概念

(一) 为了分析线路电容对过渡过程的影响, 先以最简单的集中参数为例。如图

30:

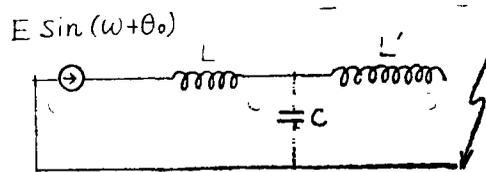


图 30

其运算回路如图 31:

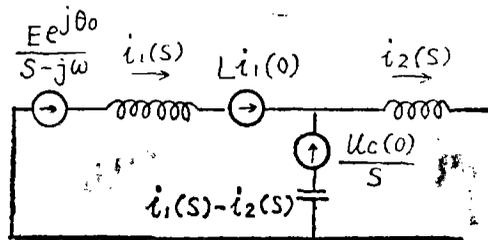


图 31

$$\text{故障前瞬间 } u_c(0) = \frac{E e^{j\theta_0}}{1 - \omega^2 Lc}, \quad i_1(0) = \frac{E e^{j\theta_0}}{j(\omega L - \frac{1}{\omega c})}$$

$$i_2(s) sL' - [i_1(s) - i_2(s)] \frac{1}{sc} = \frac{uc(0)}{s}$$

$$\text{即 } i_1(s) \left(-\frac{1}{sc}\right) + i_2(s) \left(sL' + \frac{1}{sc}\right) = \frac{uc(0)}{s}$$

$$\text{又 } i_1(s) sL + i_2(s) sL' = \frac{E e^{j\theta_0}}{S - j\omega} + Li_1(0)$$

解得:

$$E(s) + Li_1(0)$$

$$i_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} \frac{U_c(0)}{S} & SL' + \frac{1}{SC} \\ \frac{SL}{S} & SL' \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{SL}{S} & SL' \\ -\frac{1}{SC} & SL' + \frac{1}{SC} \end{vmatrix}}$$

$$= \frac{\left(SL' + \frac{1}{SC} \right) \left[\frac{E e^{j\theta_0}}{S - j\omega} + \frac{LE e^{j\theta_0}}{j\omega L - \frac{1}{wC}} \right] - L' \frac{E e^{j\theta_0}}{1 - w^2 LC}}{S^2 LL' + (L + L')/C}$$

$$= \frac{(1 + S^2 L' C) \left[1 + \frac{L(S - j\omega)}{j \left(wL - \frac{1}{wC} \right)} \right] - L' \frac{1}{1 - w^2 LC} (S - j\omega) SC}{SC(S - j\omega) \left(S^2 LL' + \frac{L + L'}{C} \right)} E e^{j\theta_0}$$

$$i_2(s) = \frac{\begin{vmatrix} \frac{SL}{S} & E(s) + Li_1(0) \\ -\frac{1}{SC} & \frac{U_c(0)}{S} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{SL}{S} & SL' \\ -\frac{1}{SC} & SL' + \frac{1}{SC} \end{vmatrix}}$$

$$= \frac{L \frac{E e^{j\theta_0}}{1 - w^2 LC} + \frac{1}{SC} \left[\frac{E e^{j\theta_0}}{S - j\omega} + \frac{LE e^{j\theta_0}}{j \left(wL - \frac{1}{wC} \right)} \right]}{S^2 LL' + \frac{L + L'}{C}}$$

$$= \frac{\frac{SLC(S - j\omega)}{1 - w^2 LC} + 1 + \frac{L(S - j\omega)}{j \left(wL - \frac{1}{wC} \right)}}{S(S - j\omega) [S^2 LL' C + L + L']}$$

$i_1(s)$ 及 $i_2(s)$ 的运算式分母方程的各根为 $S = 0$, $j\omega$ 及 $\pm j\omega_0$ ($\omega_0^2 = \frac{L + L'}{LL' C}$)

直接用运算法求解 $i_1(t)$ 及 $i_2(t)$, 并取其虚部得:

$$i_1 = \frac{1}{(1 - w^2 LC)w(L + L')} E \cos \theta_0 - \frac{1 - w^2 LC}{w(L + L') \left(1 - \frac{w^2}{w_0^2} \right)} E \sin w(t + \theta_0)$$

$$+ \left(\frac{w}{w_0} \right) \left[\frac{1}{(1 - w^2 LC)wL} - \frac{1}{\left(1 - \frac{w^2}{w_0^2} \right) w(L + L')} \right]$$

$$\times \left\{ \frac{w}{w_0} \cos \theta_0 \cos w_0 t - \sin \theta_0 \sin w_0 t \right\}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{(1-w^2LC)w(L+L')} E\cos\theta_0 - \frac{1-w^2LC}{w(L+L')\left(1-\frac{w^2}{w_0^2}\right)} E\cos(\omega t + \theta_0) \\
&\quad + \left(\frac{w}{w_0}\right) \left[\frac{1}{(1-w^2LC)WL} - \frac{1}{\left(1-\frac{w^2}{w_0^2}\right)w(L+L')} \right] \\
&\quad \times \sqrt{\left(\frac{w}{w_0}\right)^2 \cos^2\theta_0 + \sin^2\theta_0} \cos\left(\omega_0 t + \tan^{-1}\frac{w_0}{w} \lg\theta_0\right) \\
i_2 &= \frac{1}{(1-w^2LC)w(L+L')} E\cos\theta_0 - \frac{1}{w(L+L')\left(1-\frac{w^2}{w_0^2}\right)} E\cos(\omega t + \theta_0) \\
&\quad + \left(\frac{w}{w_0}\right) \left[\frac{1}{\left(1-\frac{w^2}{w_0^2}\right)w(L+L')} - \frac{1}{(1-w^2LC)wL'} \right] \\
&\quad \times \sqrt{\left(\frac{w}{w_0}\right)^2 \cos^2\theta_0 + \sin^2\theta_0} \cos\left(\omega_0 t + \tan^{-1}\frac{w_0}{w} \lg\theta_0\right)
\end{aligned}$$

当 $\theta_0 = 90^\circ$ 时, i_1 及 i_2 中都没有直流分量, 但高频 (w_0) 分量的数值为最大, 而且 i_1 及 i_2 中都存在, 而当 $\theta_0 = 0^\circ$ 时, i_1 及 i_2 中均有同一最大直流分量, 但高频分量只有前一情况的 $\left(\frac{w}{w_0}\right)$ 倍。

(二) 高压网路的过渡过程。

r_0 : 导线电阻 Ω/km ,

g_0 : 漏电导 $1/\Omega - km$,

w : 运行频率

L_0 : 导线电导 h/km ,

C_0 : 导线电容 (f/km)

$Z_0 = r_0 + jwL_0$,

$Y_0 = g_0 + jwC_0$

$\dot{r} = \beta + ja = \sqrt{Z_0 Y_0}$,

$W = Wa + jWb = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$

r 称为分布系数, W 称为线路波阻抗。

在正常运行情况下, 以线路终端电压 U_2 及终端电流 I_2 为基准, 则在距终端距离为 lkm 的线路任一点的电流 I 及电压 U 可以表为:

$$\dot{U} = U_2 \operatorname{chrl} + WI_2 \operatorname{shrl}$$

$$\dot{I} = \frac{U_2}{W} \operatorname{shrl} + I_2 \operatorname{chrl}$$

当受端负荷等于线路波阻抗 ($Z_2 = W$) 的特殊情况下:

$$U = U_2 e^{-\dot{r}l}, \quad I = \frac{U_2}{W} e^{-\dot{r}l}$$

此时, 线路无反射波, 这就是自然功率运行方式。

为了说明高压电网故障时的过渡过程, 以最简单的三相短路为例。如图32, X_R 是并联电抗, X_C 是串联电容。计算运用经典的运算微积法。

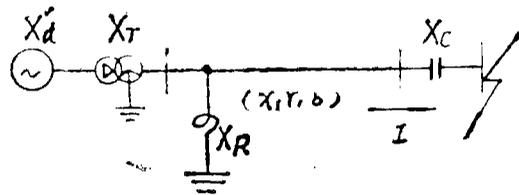


图32 系统三相短路

假定在故障前的故障点对地电压为,

$$E(t) = E_m e^{j(\omega t + \theta_0)}$$

其运算表示为

$$E(s) = \frac{E_m e^{j\theta_0}}{S - j\omega_0}$$

式中 ω_0 为电源频率

图32的计算等价网路如图33, $Z(s)$ 与 $Y(s)$ 是线路的等价T回路。

$$Z_g(s) = \frac{(X_d' + X)X_R}{X_d' + X_T + X_R} \frac{S}{\omega_0} \quad (1)$$

$$Z_c(s) = X_C \frac{\omega_0}{S} \quad (2)$$

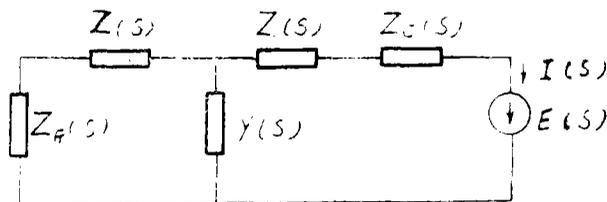


图33 计算网路图

式(1)及式(2)中的 $X'd$, X_T , X_R 分别为在额定频率的发电机, 变压器及电抗器的感抗, X 为串联电容的容抗, S 是运算子符号。

线路等价T回路参数的运算表达式为(其中 l 为线路长度),

$$Z(s) = W(s) \operatorname{th} \left[\frac{1}{2} r(s) l \right]$$

$$Y(s) = \frac{1}{W(s)} \operatorname{sh} [r(s) l]$$

而 $W(s) = \sqrt{\frac{r_0 + SL_0}{g_0 + SC_0}}$ 为运算波阻抗。 (3)

$Y(s) = \sqrt{(r_0 + SL_0)(g_0 + SC_0)}$ 为运算分布系数。 (4)

旧标到故障点的运算阻抗为:

$$\frac{1}{Y_1(s)} = Z_c(s) + Z(s) + \frac{Z(s) + Z(s)}{1 + Y(s)[Z(s) + Z_c(s)]}$$

经过一些转换, 得到故障点的运算导纳 $Y_1(s)$ 为,

$$Y_1(s) = \frac{1}{W(s)} \frac{\frac{X_c}{W(s)} \frac{S}{W_0} \operatorname{th} [r(s)l] + 1}{\left\{ 1 + \frac{X_c X_c}{[W(s)]^2} \right\} \operatorname{th} \{r(s)l\} + \frac{X_c}{W(s)} \frac{S}{W_0} + \frac{X_c}{W(s)} \frac{W_0}{S}} \quad (5)$$

在假定是线性回路的基本前提下, 由运算法原理可知, 故障电流中自由分量的频率及衰减系数决定于式(5)中分母所构成方程的根。

在超高压网路中, 线路的有功损耗很小, 可以相当简单但比较精确的求得故障电流中的自由分量频率值, 取 $r = g \approx 0$, 则 $W(s) \approx W_0$, $r(s) \approx \sqrt{L_0 C_0} S$, 以此关系代入式(5)分母的方程中, 并取 $S = jW$, 得求解自由分量频率 W 的一个超越方程,

$$W_0 \left(\frac{W}{W_0} \right) - \frac{X_c}{W_0} \left(\frac{W}{W_0} \right) = \left(1 + \frac{X_c X_c}{W_0^2} \right) \operatorname{tg} \left(\sqrt{W_0^2 L_0 C_0} l \frac{W}{W_0} \right)$$

可用图解法求解, 表1是一个具体数字例的求解结果。

$$r = 0.02 \Omega / \text{km}, \quad X = 0.293 \Omega / \text{km}, \quad b = 3.93 \times 10^{-6} \Omega / \Omega - \text{km}$$

$$X_c = 68 \Omega \quad X_l = j\omega C_0 l$$

表1 自由振荡频率前三个的计算结果

l (km)	$\frac{X_c}{X_L} \%$	W_1/W_0	W_2/W_0	W_3/W_0
200	0(注)	0	9.21	22.76
	25	0.34	9.24	22.77
	50	0.49	9.27	22.78
	75	0.60	9.29	22.79
	100	0.68	9.34	22.80
400	0	0	5.18	11.73
	25	0.39	5.23	11.76
	50	0.55	5.26	11.78
	75	0.66	5.30	11.80
	100	0.75	5.34	11.82
600	0	0	3.71	8.03
	25	0.42	3.77	8.06
	50	0.57	3.82	8.09
	75	0.68	3.87	8.12
	100	0.77	3.92	8.15

注: 代表直流分量。

计算三种线路长度 ($l = 200, 400, 600\text{km}$) 和五种串联补偿度 ($\frac{X_c}{X_L} = 0.25, 50, 75, 100\%$, X_L 为线路全感抗)。由表 1 可见, 当线路长度不变时, 自由分量的频率随串联补偿度的增大而增高, 但显著增高的只是最低自由振荡频率 W_1 。而当串联补偿度不变, 只是线路长度变化时, 最低振荡频率略有增高, 但所有高次频率显著地反比于线路长度降低 (W_2, W_3 等等)。

这说明, 自由分量中的低频分量主要由于存在串联补偿电容所产生, 当补偿度为零时, 出现了直流分量, 而高频分量则由线路本身的分布电容所产生。

串联电容补偿线路的低频分量的近似算法, 可用公式

$$\frac{W_1}{W_0} \approx \sqrt{\frac{X_c}{X_c + X_L}}$$

当 $l = 200\text{km}$ 时, 误差不大于 2%, $l = 600\text{km}$ 时, 误差可达 10%。

在没有串补的线路, 非周期分量的衰减时间常数为 $\frac{X_L + X_c}{W_0 R}$, 对高次频率, 一般说来, 频率愈高, 衰减也愈快, 极高次的振荡分量的衰减时间常数约为 $\frac{2w_0 L_0}{r_0}$ 。

在假定回路电阻极小的情况下, 取故障瞬间的故障前电压为 $E_m \sin(\omega_0 t + \theta_0)$, 则故障电流的表示式为:

$$i(t) = I_0 \cos(W_0 t + \theta_0) + \sum I_n e^{-\frac{t}{T_n}} M \cos W_n t + \theta_n$$

式中右侧第一项为强制分量, 第二项为自由分量。

取 $W_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$, $\alpha_0 = \sqrt{W_0^2 L_0 C_0}$, 可以求得各电流值如下:

$$I_0 \approx \frac{E_m}{W_0} \frac{\frac{X_c}{W_0} \operatorname{tg} \alpha_0 l - 1}{\left(1 + \frac{X_c X_c}{W_0^2}\right) \operatorname{tg} \alpha_0 l + \frac{X_c}{W_0} - \frac{X_c}{W_0}}$$

$$I_n = \frac{2 E_m}{W_0} \frac{\left(\frac{W_n}{W_0}\right)}{1 - \left(\frac{W_n}{W_0}\right)^2} \sqrt{\cos^2 \theta_0 + \left(\frac{W_n}{W_0}\right)^2 \sin^2 \theta_0}$$

$$\times \frac{1 - \frac{X_c}{W_0} \frac{W_n}{W_0} \operatorname{tg} \alpha_0 l \frac{W_n}{W_0}}{\frac{X_c}{W_0} \frac{W_n}{W_0} + \frac{X_c}{W_0} \left(\frac{W_n}{W_0}\right) + \left(1 + \frac{X_c X_c}{W_0^2}\right) \alpha_0 l \frac{W_n}{W_0} \left(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0 l \frac{W_n}{W_0}\right)}$$

在无串补的线路 $X_c = 0$, 此时

$$I_0 = \frac{E_m}{W_0} \frac{\frac{X_c}{W_0} \operatorname{tg} \alpha_0 l - 1}{\operatorname{tg} \alpha_0 l + \frac{X_c}{W_0}}$$

$$I_n = \frac{2 E_m}{W_0} \sqrt{\cos^2 \theta_0 + \left(\frac{W_n}{W_0}\right)^2 \sin^2 \theta_0} \cdot \frac{1 + \left(\frac{X_c}{W_0}\right)^2 \left(\frac{W_n}{W_0}\right)^2}{\frac{X_c}{W_0} + \alpha_0 l \left[1 + \left(\frac{X_c}{W_0} \frac{W_n}{W_0}\right)^2\right]}$$

据此可求得直流分量 ($W_1 = W_1 = 0$),

$$I_1 = \frac{2 E_m \cos \theta_0}{X_C + X_L}$$

由以上各式可见, 自由分量初始值的大小, 与故障瞬间故障相压的相角 θ_0 有关, 其关系为

$$\sqrt{\cos^2 \theta_0 + \left(\frac{W_n}{W_0}\right)^2 \sin^2 \theta_0} = \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_n}$$

对于低频分量 ($\frac{W_1}{W_0} < 1$), 当 $\theta_0 = 0$ 及 180° 时幅值最大, 即当电压过零短路时为最大, 而当 $\theta_0 = \pm 90^\circ$, 即电压在最大值附近短路时最小, 最大与最小值之比为:

$$\frac{I_{1,max}}{I_{1,min}} = \frac{W_0}{W_1}$$

对于直流分量 ($W_1 = 0$), 当 $\theta_0 = \pm 90^\circ$ 时最小, 为零, 也在 $\theta_0 = 0$ 及 180° 时最大。

但对于高频分量, ($\frac{W_n}{W_0} > 1$), 幅值在 $\theta_0 = 0$ 及 180° 时最小, 而当 $\theta_0 = \pm 90^\circ$ 最大。相应的最大与最小值之比为 ($n = 2, 3, 4 \dots$)。

表 2 $\theta_0 = 0$ 的强制分量与三个自由分量的数值

$l(km)$	$\frac{X_C}{X_L} \%$	$-\frac{I_0}{E_m/W_0}$	$\frac{I_1}{E_m/W_0}$	$-\frac{I_2}{E_m/W_0}$	$-\frac{I_3}{E_m/W_0}$
200	0	2.03	4.30	0.0927	0.0160
	25	2.08	2.41	0.0922	0.0160
	50	2.59	2.75	0.0916	0.0160
	75	3.01	3.21	0.0910	0.0160
	100	3.59	3.77	0.0904	0.0160
400	0	1.26	2.96	0.1474	0.0307
	25	1.45	1.67	0.1442	0.0307
	50	1.72	1.93	0.1412	0.0305
	75	2.11	2.31	0.1381	0.0304
	100	2.72	2.94	0.1352	0.0303
600	0	0.82	2.25	0.2009	0.0441
	25	0.94	1.24	0.1978	0.0430
	50	1.11	1.39	0.1832	0.0434
	75	1.35	1.61	0.1752	0.0429
	100	1.72	1.95	0.1671	0.0424

$$\frac{I_{,max}}{I_{,min}} = \frac{W_0}{W_0}$$

表 2 为 $\theta_0 = 0$ 时的三个分量短路电流值 ($W_0 = 273.4 \Omega$, $\alpha_0 = 1.07 \times 10^{-3}/km$, $X_c = 68 \Omega$)。

表 2 中的 (一) 号表示强制分量与 $I_2, I_3 \dots$ 的相位与 I_1 在故障初瞬间相反。

从表 2 可以发现, 当计算 $\theta_0 = 0$ 的情况时, 高频分量可以略去不计, 对于有串补的线路, 低频分量的幅值略大于强制分量值, 而对于无串补的线路, 出现的直流分量会大大超过强制分量值。但请注意, 这只是流入短路点的故障电流的情况。

反之, 当计算 $\theta_0 = \pm 90^\circ$ 的情况时, 高频分量 ($I_2, I_3 \dots$) 的幅值将是表 2 所列数值的 $\frac{W_0}{W_0}$ 倍, 以 $X_c = 0$ 的情况为例, 如表 3:

表 3 $\theta_0 \pm 90^\circ$ 的电流幅值

l	$\frac{I_0}{E_m/W_0}$	$\frac{I_1}{E_m/W_0}$	$-\frac{I_2}{E_m/W_0}$	$-\frac{I_3}{E_m/W_0}$
200	2.03	0	0.854	0.364
400	1.26	0	0.763	0.360
600	0.82	0	0.742	0.354

(三) 在电压相位何处开始故障的机率问题

转而议论在高压电网中, 在电压相位何处开始故障的机率问题。

国外有人认为, 95% 以上的故障都发生在电压峰值的 40° 前的范围内, 从能收集到的高压 (100KV 以上) 线路故障的录波照片证实了这一点。从理论上说来, 电缆, 变压器和发电机等的故障是由比较缓慢的过程如热、老化等引起, 当电压达到峰值附近击穿绝缘产生。线路绝缘子的污秽闪络与导线相碰等等也是类似情况, 但雷击情况需稍加说明。

对于较低电压的线路, 雷击闪络的可能性较大, 同时与是否发生在运行电压是否在峰值附近, 关系不大, 对于超高压线路说来, 随着运行电压增高, 操作过电压的要求水平也相应增高, 虽由于塔高较易遭受雷击, 但总之说来, 由于线路冲击电压水平高, 因而雷击闪络的可能性较低。但若发生雷击闪络, 也将发生在运行电压为峰值的附近。这是因为即使遭受直接雷击, 虽然雷击电流本身可能高达 100 千安, 但持续时间不过一、二微秒, 一次雷击总的电荷量不大可能超过 1 库伦。如果雷击发生在运行电压的零值附近, 由于雷击电流的能量不足以建立一个使空气离子化形成的低电阻通道, 如果雷击后没有工频续流维持电弧, 只要雷击电流形成通道恢复绝缘的速度快于工频电流的上升速度, 线路将继续正常运行。这是为什么超高压线路故障发生在运行电压零值附近的可能性很小的理由。

超高压线路故障时过渡过程对继电保护的影响, 对于没有串补的线路来说, 除了直

流分量的影响为一般所注意而外，有以下情况值得研究：

(1) 对于如图34的系统，当BC线段故障时，流经保护的故障电流中的高频分量会使线路BC上B端的（例如一段距离保护）产生测量误差。

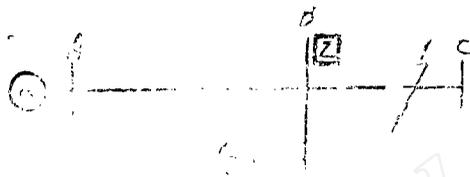


图34 系统情况

(2) 当在B母线发生故障时，线路BC上B端的保护是否可能由于BC线路的自由分量失去方向性？

(3) 对于AB线路的纵连保护（例如相差动），当在B母线短路时，由于A与B两侧的自由分量不同，是否可能引起误动作？而在AB线路本身发生故障时是否引起延时动作？如此等等。

对于带串补的线路，除了过渡过程自由分量的影响而外，还有其他一些特殊问题，例如间隙非对称击穿，保护段阻抗大小及性质变化剧烈，电源侧系统阻抗可能是容性等，这又是另一类的专门问题。

还有一点需要提及，上面谈的只是第一次实际故障发生时的情况。对于合闸或重合闸，由于现代开关的合闸速度很快，因而接通电路的瞬间往往与运行电压绝对值大小无关。如果切除前一次故障时在变流器铁心中留下较大剩磁，又在适逢电压为零值附近的瞬间进行重合闸，当重合闸于故障未消除情况下，变流器的铁心就很容易为一次电流中的直流分量所饱和，这又是另一种实际可能。

二、变流器饱和过程的简要机理及其他

(一) 对继电保护工作者说来，对于变流器所关心的主要问题是，允许多大的励磁电流或误差电流存在，或者说，多大的误差电流可以允许不予考虑。对于饱和的理解，可以认为是对应于在最大允许误差电流时的变流器饱和曲线上的某一点。一般，此点远在饱和曲线弯曲部分的上部。根据这样的理解，在分析变流器饱和过程的机理时，可以按如下步序分析：

(1) 在饱和前，一次电流认为是全部转变到二次回路，变流器励磁阻抗为无穷大。

(2) 在到达饱和点的瞬间，变流器完全失去作用，一次电流全部转化为误差电流，二次电流则迅速降为零。

(3) 当一次侧电流为零并反相时，变流器磁通降至饱和值以下，变流器又恢复了无穷大励磁阻抗，一次电流又完全转变到二次回路直到再一次饱和时为止。

在饱和前，假定了变流器的励磁阻抗为无穷大，因此，变流器将忠实地传变一次侧

偏移电流到二次。

$$I_s = \frac{I_p}{N_s} \left[\sin(\omega t + \theta) - \sin \theta e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (1)$$

I_p = 对称一次电流的峰值。

N_s = 变流器的二次对一次的圈数比。

θ = 一次电流的合闸角。

$R_1 L$ = 一次系统的电阻及电感。

若二次回路的电阻为 R_2 ，电感为 L_2 ，变流器的初始残磁为 ϕ_R ，则可求得变流器铁心中的磁通为，

$$\phi_c = \frac{I_p Z_2}{W N_s^2} \left[-\cos(\omega t + \theta + \theta_2) + \cos(\theta + \theta_2) - W \cos \theta_2 \sin \theta \left(\frac{L}{R} - \frac{L_2}{R_2} \right) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right] + \phi_R \quad (2)$$

式中，

Z_2 = 变流器负载阻抗。

$\cos \theta_2 = R_2 / Z_2$ 。

使磁通偏移而与时间无关的项是 ϕ_R 与 $\frac{I_p Z_2}{W N_s^2} \cos(\theta + \theta_2)$

关于残磁 ϕ_R 的问题，下面将简单提及。

在式(2)中，取 $\theta = \frac{\pi}{2}$ ，可以相当近似的求得第一周波内的最大磁通为，

$$\phi_{cmax} = \frac{I_p Z_2}{W N_s^2} \left[\sin(\omega t + \theta_2) - \sin \theta_2 - \left(\frac{W L}{R} \cos \theta_2 - \sin \theta_2 \right) \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right] + \phi_R \quad (3)$$

为便于简单说明机理，假定一次电流对称，二次负载为纯电阻性，即 $\sin \theta = \theta = 0$ ， $L_2 = 0$ ，则由式(2)得，

$$\phi_c = \frac{I R_2}{W N_s^2} \left[-\cos \omega t + 1 \right] + \phi_R \quad (4)$$

式(4)为迭加在 ϕ_R 上的一完全偏移的磁通，如图35。因为假定变流器铁心具有矩形饱和曲线，故磁通保持偏移，如果在到达 ϕ_s 时开时饱和(图35b)变流器立即失去感应电压的能力，故在 t_s 时，二次电流立即降为零。到 t_1 时，一次电流反相，使变流器退出饱和，于是二次电流又开始正常传变。其后变流器相当于具有有效残磁 R_f 的情况工作，忠实传变一次电流到二次回路。对比图35a及图35b，当铁心未达到饱和时的残磁(图35a)较高。在假定为矩形饱和曲线的情况下，只出现了一个误差电流波。在实际的励磁电流与磁通的非线性关系条件下，表现出的是较小的第一个误差电流波和随后的衰减的误差电流波。

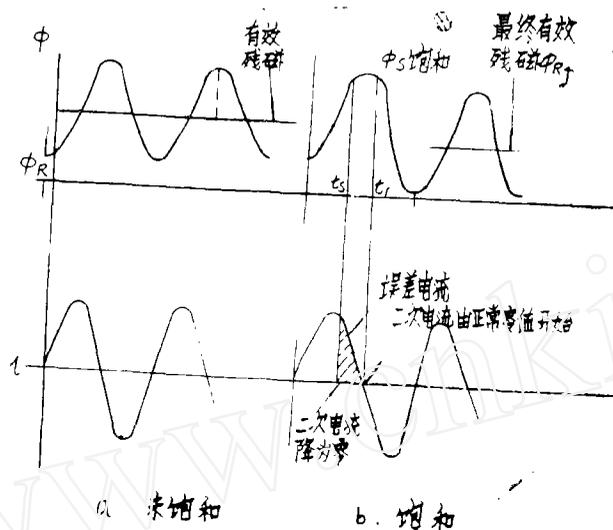


图 35

较为复杂的是在偏移一次电流波的情况，如图36， $\theta = \frac{\pi}{2}$ ， $\cos \theta_2 = 0.5$ ， $\frac{L}{R} = 0.05$ ，如果饱和磁通为 ϕ_s ，达到饱和所需时间为 t_s 。根据假定，当到达饱和时，二次电流立即降为零，一次电流全部变为误差电流。当然实际二次电流不能突降为零，而是按二次回路时间常数衰减。但假定突降为零，不但接近实际情况，也便于说明以下的变化情况。到时间 t_1 变流器退出饱和，又开始正常传变，一次电流全部传到二次回路，在整个负半周，磁通一直下降，一直又到下一正半周，当其时间电流面积 A_1 等于负半周的面积时，铁心又开始饱和。对于以后所有周波，直到正半周的电流的面积等于负半周的时间电流面积，即一次电流中的直流成分衰减之后，误差电流波才逐渐衰减到零。

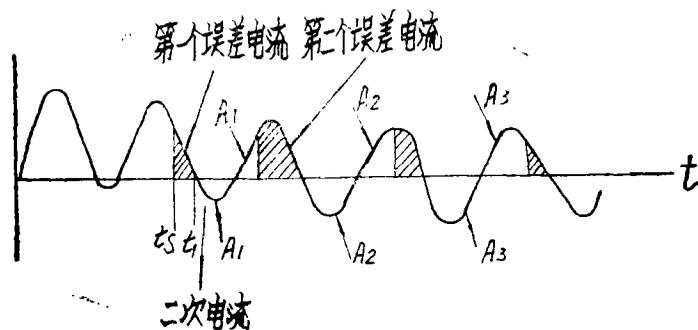


图 36

以上简要说明了变流器饱和过程的机理。从这里，可以引伸一些有用的结论：

(1) 不管变流器的饱和情况如何严重，由施加一次电流开始到变流器饱和总有一个时间过程，在未达到饱和前，变流器可以认为是一个理想的变流器。

(2) 一次电流愈大, 饱和的时间过程愈短, 一次电流时间常数愈大, 出现误差电流的时间愈长, 每一周传变的二次电流愈小。这也就是为什么超高压线路对变流器饱和问题特别引起重视的理由所在。

(3) 在国外, 利用了变流器饱和过程的机理, 抓住故障开始变流器在短时间内仍然可以正确传变, 而在变流器饱和后, 从二次看来, 等价为一短路回路的原理, 研究成功了一些快速母线保护。

(4) 对于超高压线路保护用的距离保护和电流保护等, 加速保护的動作时间, 是提高动作可靠性的有力措施。同时, 对变流器特性的要求, 也必须配合一次系统参数, 二次回路参数, 保护装置特性和其動作时间等等, 才能获得正确解决。

(5) 为了防止变流器饱和, 国外普遍采用了变流器铁心加间隙的解决办法, 其残磁小, 且不易饱和, 但此法不能提高铁心的载磁能力, 破坏了变流器的性能, 降低其精度, 迫使允许二次负担降低。反过来, 如果用同样的闭合铁心, 降低其二次负担, 工作情况会更好一些, 这是国外有的制造厂的另一种看法。

看来, 为了满足继电保护的要求, 特别在今后的超高压系统中, 应该对变流器提出什么样的要求, 对它的饱和性能提出什么样的判据, 仍然是值得研究的问题。

也简单的提一下关于变流器残磁的问题。

由于存在残磁, 在一次电流值小于正常饱和水平时, 也会使变流器饱和。当采用了高饱和水平的冷轧硅钢片作为变流器的铁心时, 由于它的剩磁高, 近区的严重故障所留下的剩磁往往易于使下一次故障产生时出现饱和。由于开关在一次电流过零时切断电流, 因而铁心剩磁大小与二次负担的阻抗角有关。如果二次负担为纯电感性。当一次电流为零时, 二次感应电压为最大值, 磁通为零, 因而无剩磁。对于纯电阻性的二次负担, 在一次电流为零时, 二次感应电压为零, 磁通为最大, 因而剩磁为最大。

国外研究说明, 在最初30秒之后的剩磁衰减极小, 同时在开关合闸后, 尽管正常负荷电流引起交变磁通产生去磁效应, 但高剩磁仍然可能持续相当长的时间。

(二) 对于开关后备结线中的检查电流有无的继电器要求快速复归, 除了注意继电器本身的复归性能外, 还要注意在超高压线路快速切除一次故障电流时, 二次可能感应衰减直流分量电流的问题。英国人做过试验, 试验时用典型的变流器, 二次额定电流 I_A , 拐点电压250伏, 二次负担2欧姆。做了三种试验: (1) 一次通过20倍额定电流的对称电流, 在一次电流过零点断开时, 二次电流也同时降为零。(2) 一次回路通过时间常数为20毫秒的零电压时合闸于故障的全偏移电流使变流器铁心剩磁最大。在超高压网络中, 由于故障快速切除, 因而当一次电流中的直流分量未全部衰减时一次故障电流将在过零时断开, 如果切开时的电流波形中的直流与交流分量同侧, 在切故障当时, 铁心处高于饱和状态, 一次电流断开后, 铁心中的磁通将衰减到某一相对应的剩磁值, 从而在二次回路中感应出直流衰减电流如图37。饱和程度愈大, 饱和磁通与相应的剩磁值之差愈大, 感应二次电流愈大(如附表), 从而使接于变流器二次的检查电流的继电器延时复归。(3) 同样的试验, 如果切除故障晚了半个周波, 在切除故障当时, 变流器磁通低, 在一次电流过零断开的同时, 二次电流也几乎完全消失。

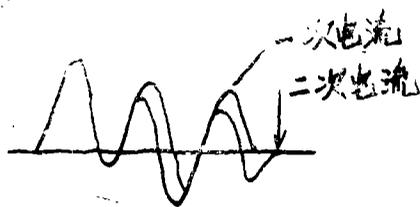


图 37

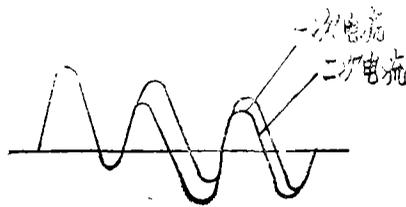


图 38

B_m (Weber/m ²)	1.8	1.6	1.4	1.0	0.6	0.2
B_r (Weber/m ²)	1.45	1.35	1.23	0.85	0.51	0.18
$B_m^{-1/2}$ (Weber/m ²)	0.35	0.25	0.17	0.15	0.09	0.02

上述现象（切故障时变压器铁心释放磁能在二次回路感应电流），对带间隙的变流器情况尤为严重，这是因为剩磁几乎为零。

（三）关于电容式电压互感器。

从经济上考虑，超高压电网广泛采用了电容式电压互感器，如图39，其等价回路如图40。

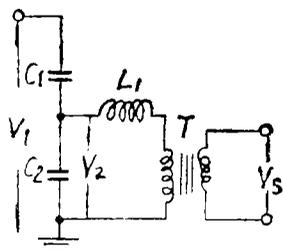


图39 电容式电压互感器的基本回路

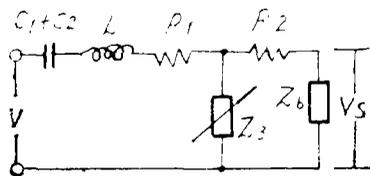


图40 电容式电压互感器的等价回路

C_1, C_2 = 电压分压器

L_1 = 调谐电感

T = 中间变压器

V = 在 C_2 上的分压电压（换算到中间变压器二次侧）。

L = 调谐电感与中间变压器漏抗，

R_1, R_2 = 回路电阻。

Z_3 = 中间变压器铁损及励磁阻抗。

Z_b = 二次负载阻抗。

电容分压器的分压比一般取为系统电压的10%左右。 L 主要为了对 C 实现相位补偿，使 V_2 与 V 同相位。

电容式电压互感器的过渡过程性能比一般的电磁型电压互感器差，在一次电压因故障突然变化时，二次侧电压不能立即随之改变为故障值，而需要经过一个振荡过程，振荡过程的频率决定于分压电容与整个回路中各种电感及电阻等参数的组合情况。

一般此自由分量的频率值远低于系统频率，同时衰减过程也比较长。图41是实际的一次电压与二次电压的波形图。对超高压电网采用快速保护说来，这一衰减过程对保护动作的影响很大。对距离保护说来，

(1) 影响动作时间，特别在保护范围末端附近故障而母线残压又低的情况下（即电源阻抗对故障阻抗之比很大）尤为严重。

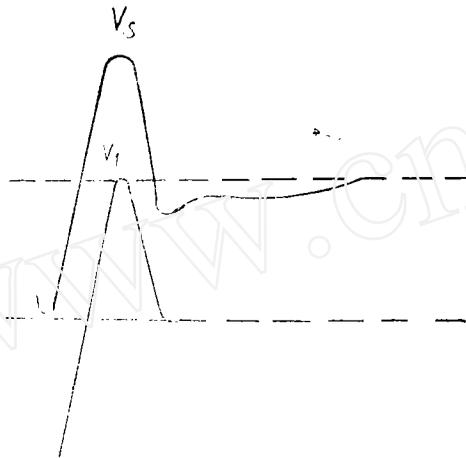


图41 一次电压 V_1 降为零时的二次电压 V_2 的变化

图42是英国人用同一继电器用两种电压互感器对比试验的结果，最长的动作时间是当电压在零值附近发生故障时。最短动作时间的影响不大，但最长动作时间可能延长一倍。许多其他的试验也有类似结果。一般说来系统阻抗比愈大，二次回路储能愈大，这个影响愈严重，电源阻抗比愈大，不但残压愈低，同时短路水平也愈小。

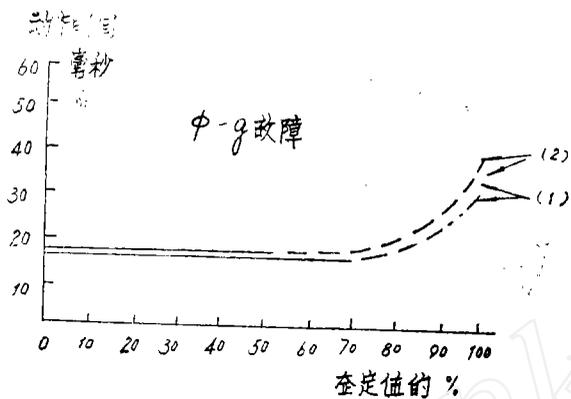
(2) 有可能失去方向性。同样的一个英国的试验结果。

故障种类	$\phi-g$				$\phi-\phi$				3ϕ			
	36	9	$2\frac{1}{4}$	1/2	36	9	$2\frac{1}{4}$	1/2	18	9	$2\frac{1}{4}$	1/2
系统阻抗比	36	9	$2\frac{1}{4}$	1/2	36	9	$2\frac{1}{4}$	1/2	18	9	$2\frac{1}{4}$	1/2
最大正向超越%	13	1	0	0	12	1	0	0	3	3	0	0
反方向出口故障(零电压)	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓

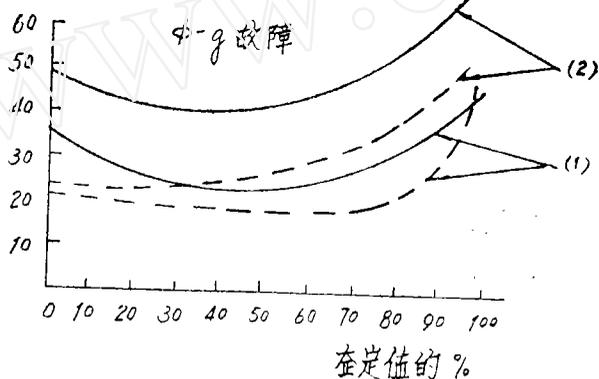
〔注：由于未说明距离元件的接线方式（主要是否引入了非故障相电压），很难判明 $\phi-g$ 及 $\phi-\phi$ 为什么不误动作，但 3ϕ 的误动作是确实的〕。

法国有人认为，为了保持第一段距离测量的足够精度，特别对于短的线路，如用CVT，把保护的動作时间适当增长至30至35毫秒较好。

如果得到CVT二次衰减的精确数据，可以相当准确地选定所需的最小动作时间。对于长线路，用CVT问题不大。



(a) 最短动作时间



(b) 最长动作时间

图 42

.....接于一般电磁式电压互感器。

——接于电容式电压互感器。

电源阻抗比：系统阻抗/整定阻抗 (1)9 : 1 (2)36 : 1

法国有人提出了一个很简单的公式，用以选择允许相对测量误差 $\left(\frac{\Delta Z_p}{Z_n}\right)$ 与最小整定时间的关系如下： $\frac{\Delta Z_p}{Z_n} e(t) (SIR)$

式中 $e(t)$ 是对应于额定电压 U_n 的CVT二次电压暂态相对误差的衰减时间函数的幅值。

SIR 是电源阻抗比(电源系统阻抗/整定阻抗)。

例如在20毫秒后，CVT的二次暂态误差仍有故障前额定值的3%，同时假定 SIR 为30，则距离测量误差为90%，完全可能在40毫秒后， $e(t) < 1\%$ ，但保护又太慢。因而对短线路且 SIR 很大时，又采用了有相当过渡过程的CVT时，可能就不得不放弃快速距离一段，转而用高频闭锁方式等等。

在英国，为了改善已有400千伏CVT的工作性能，在原结合电容的对地端又串入了一个分压电容，取得分压后经放大器输入至距离保护等直接受电压二次回路暂态过程影响的保护装置的电压回路中，已取得成果。

(四) 分裂导线在短路故障时阻抗变化的问题

分裂导线的线路电抗，总是按照固有的几何位置来计算。实际，只有当由于静电场产生的排斥力矩与通过电流所产生的电磁场力矩相平衡的时候才能保持固有的几何位置。短路电流的存在将使分裂导线相互碰撞而使几何位置变形，因而使线路电抗改变，计算与试验结果如图43。

这个现象不会影响第一段快速保护，但却直接影响了延时二段的灵敏度。

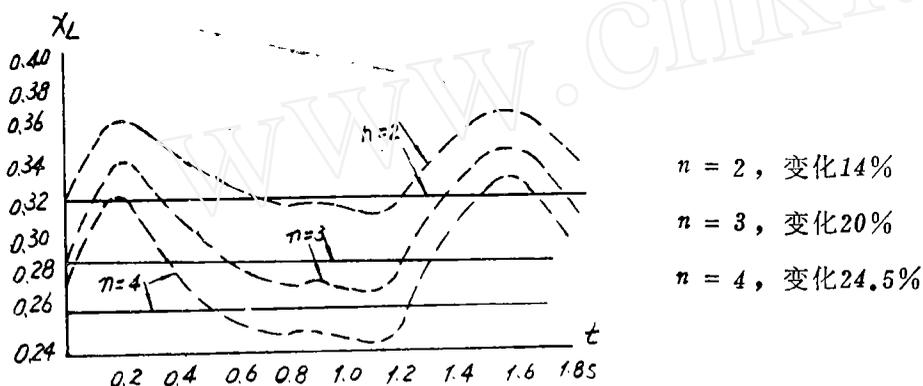


图 43

由于在短路切除后，所有流过短路电流的分裂导线的线路，仍然保持着增加了的电抗，因而也影响了系统稳定。波兰人在研究一个并联送电1,000MW的400千伏线路的稳定问题时发现，如果按 X_2 为常数，则故障切除时间0.15秒可保持稳定，但因 X_1 变化，切除时间必须不大于0.12秒才能保持系统稳定。

(五) 长距离超高压线路带机组甩负荷：



图 44

在机组满负荷出力的情况下，如果受端开关B因故断开（例如线路发生接地）限制瞬间电压突升的因素是线路上装设的电抗器和变压器的励磁电流。其后的持续电压大小，与机组励磁调节性能有关，但无论如何，总有产生工频过电压的问题。

在甩负荷的过程中，由于电压所引起了数值很大的励磁电流，有可能使变压器差动保护误动作。用正常结线的谐波制动差动保护在此时“看不到”什么三次谐波电流，因此在过电压只为额定值的125%时就可能误动作。国外，在工程设计中提到这个问题。据报道，美国有一个系统，（克里夫兰电照公司），自1954年开始，就把大型单元发电机变压器

组的差动保护的结线标准化。该系统在1953年末一主力电厂出口附近故障切开后，在励磁调节系统调节电压的过程中，使一18/132千伏150MVA的变压器过电压到130%，引起差动误动作，其后为防止此种误动作，采用了如附图的差动保护结线。与差动保护用发电机侧变流器相同变比的变流器接入变压器 Δ 线卷中，三个变流器并联接入三串联补助变流器的一次侧，补助变流器的二次侧接入差动保护的制动线卷中，以获得三次谐波制动，由于在 Δ 线卷中的变流比同时供应零序电流，因而需将正常的差动用变流器接线改为Y侧的变流器接为Y，而 Δ 侧变流器接为 Δ 。

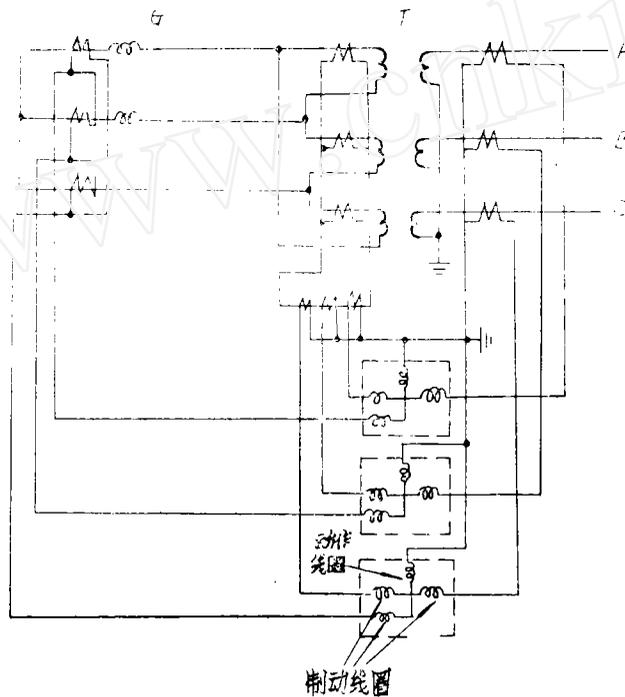


图 45

注意两点：

(1) 补助变流器的变比决定于电力变压器的零序等价回路。对于外铁式变压器，其比为1/1。但对内铁式变压器，由于零序阻抗不等于正常阻抗，其变比要据此选定。在所述的那个系统中，一开始因为没有考虑后者，在外部单相接地时曾引起一台260MV A变压器差动误动作。

(2) 这个结线只合于采用谐波制动的变压器差动保护。

在采用这种差动结线的另一美国电力系统，在机组起动试运过程中，由于电压调节器的故障开路，曾短时间引起机组150%的过电压，立即将调节器切开，机组恢复正常，在此过程中未引起发电机变压器差动保护误动作。

在过电压时的变压器励磁电流大小，与变压器设计的磁回路特性有关。

(六) 选择解列的时间问题。

美、苏等国都提到了希望解列装置在两侧电源电势角摆开又恢复到较小值才动作于跳闸问题。原因是当 $\theta = 180^\circ$ 时解开线路，会产生很大的过电压。

图中绘出了电压分布的情况。

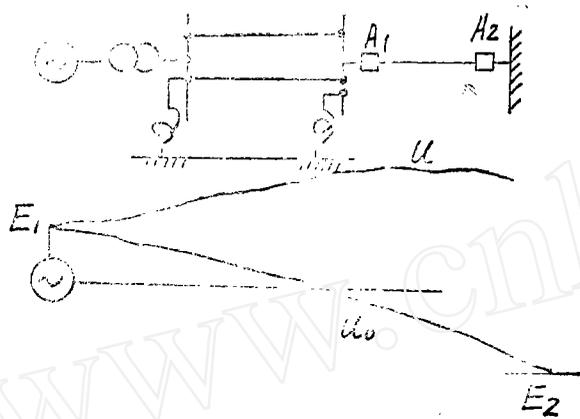


图 46

当线路从一端切除后（例如开关 A_2 断开），开始了由于线路电容电压改变所引起的过渡过程。

取 U_0 为振荡时的电压， U 为断开 A_2 后的强制电压分量，则最大的过电压值近似为，

$$U_M = U + (U - U_0) K$$

式中 K 是过电压系数。

计算过电压时，必须考虑到 U_0 与 U 的不同符号，还应考虑，发电机可能被强行励磁，因此发电机的内电势可能升高 $20 \sim 30\%$ ，如果线路上有单相故障，在 A_2 断开后，仍暂时有短路，则过电压将再增加 $10 \sim 15\%$ 。

因此，最大的操作过电压倍数可达 $3 \sim 35$ 倍额定相电压。

当然，这些都是高压工作者在设计系统线路必须考虑和处理的问题，但若有可能，从继电保护的角度，减少出现系列过电压的机率总是可取的。

第四部分 国外继电保护的一些情况

一、一些国家超高压线路保护的简要情况：

在许多国家里，在超高压线路上除装备了后备保护外，大都配备了两套独立的主保护，所有辅助设备，包括变流器，电感互感器，开关跳闸线卷及直流电源等都双重化。其中变流器及开关跳闸线卷完全分开，电感互感器分开用不同的熔断器，直流电源或者完全独立或者公用一组但（+）与（-）极分别用熔断器。

（1）英国超高压线路的典型主保护如下表：

线路长度	第一主保护	第二主保护
8 哩以下	传达线差动	传达线差动
8 ~ 12哩	传达线差动	传达线差动或闭锁距离
12 ~ 15哩	传达线差动	传达线通道加速方向阻抗
15 ~ 40哩	载波相差动	传达线通道加速方向阻抗
40哩以上	方向阻抗载波通道加速	传达线通道加速方向阻抗

在英国的200公里以下275及400千伏线路，广泛采用了相差动，半波比相，闭锁角约50°，当短路电流小时，闭锁角自动增大，用以自动补偿线路电容电流的影响。

在英国，近年来随着系统发展，才提出了加强主保护，缩短主保护（40毫秒）与后备保护（300毫秒）动作时间及开关拒动等问题。

为了防止开关拒绝动作保护的误动作，主要措施是双重化，例如必须有两个检查电流的继电器动作才能起动。同时，该电流继电器要快速复归（考虑变流器二次在断电后的衰减电流），以缩短后备动作时间。对开关拒动回路，第一主保护出口动作的同时，瞬时起动第二跳闸线圈，由检查电流的瞬时及时间回路串联起动后备开关回路。

英国普遍采用园特性的阻抗元件。同时认为，四边形特性阻抗元件在某些特殊情况下也有用处，但如果价格便宜，也可能较多采用。

在英国的400，275及132千伏系统，不采用快的自动重合闸，而普遍采用隔离开关自动操作与开关自动合闸（所谓“自动切换与重合闸”方式）相配合的方式、对于T接线路，故障线段自动断开后才恢复送电。以某一275千伏变电所为例，在一T接变压器线路故障后的恢复时间约为30到45秒，原因是考虑了冬季时变压器隔离开关操作很慢。允许这样做，是因为电网连络紧密，总有旁路联系。整个操作需要藉助遥讯，为抑制操作过电压和铁共振，需选择操作顺序，因而比较复杂，打算采用半导体化的逻辑回路，并希望用小型计算机或微型处理机处理。他们的观点认为，这种自动处理方式虽然较慢，但比由地区调度用电话通知现场操作快得多。同时，在坏天气时，往往连续多处故障，可以使调度人员避免一般性操作处理而集中注意力于全网问题。

（2）在美国，缩短后备保护动作时间的办法是采用两套带通道的主保护，一般采用不同的工作原理，有时用不同厂家产品，或是两套半导体型，或是两套电磁型，或是一套半导体型，一套电磁型。广泛采用的三种工作方式是，方向比较闭锁，相位比较闭锁和远方跳闸（由一段直接送跳闸讯号，或加速对侧第二段）。同时采用不同通道，电力线载波，经微波的音频或经租用电话线的音频。后备保护用非传达线的瞬时及距离保护。配置方式并无一定趋向。

美国用的距离保护主要是“透镜形”阻抗特性，多重偏移方向阻抗特性和带“割线”（lelinder）的方向阻抗特性等元件。根据他们的运行经验认为，对高压及超高压系统的快速保护说来，弧光电阻的影响几乎可以略去不计，又认为，如果发生高电阻故障，那一种特性的阻抗元件也无能为力。美国发生过好几次345—500千伏线路对树放电

的事故，电抗性特性的阻抗元件也同样拒动，只得乞灵于灵敏的纵连接地保护（115千伏及以上线路普遍采用）。因而认为，从运行观点说来，对阻抗元件特性形状并无特殊要求。

目前在美国，振荡继电器主要用于闭锁重合闸，当然也有用于闭锁跳闸的。很少用于跳闸的主要原因是因为用阻抗向量划过一定区域来判别失步有困难。当失步时，都允许距离一段跳闸，因为已证明不能恢复同期。

美国普遍采用环形及一个半开关接线而无特殊超高压母线，因而不需专用母线保护，而有不少超高压线路接的终端变压器没有高压开关。

在北美系统的220千伏及以上电压线路，传统习惯采用间隙时间约0.4秒的快速三相重合闸，近年来，也有在传输大容量电厂主要出力的500千伏线路上采用间隙时间约0.5秒的单相快速重合闸的。

加拿大的735千伏线路也不考虑采用单相重合闸。

在美国，习惯用中性点电流作接地方向元件的极化量。当并列线路多于二回，同时有一条或更多回线路接于不同变电所时，由于回路路径间的高互感及大的短路电流可能使离故障点较远的 Δ/Δ 变压器的零序电流反相，因而许多系统用负序功率作接地方向元件。一般负序分量较小但较稳定，而零序分量则可能很小，同时随故障点的远近变化很大。

据北美十个电力系统的统计（到74年），共有37条带串联电容补偿的230，345及500千伏线路，全部在美国远西部各洲。其中14条线路的串补站在离开变电所的线路中，23条线路的串补在线路一端或两端各一半。其中15条用相差，34条用距离方向保护（由于345及500千伏用两套主保护，故装置数大于线路数）。在距离保护可能误动作的区域内，依靠保护间隙击穿使串联电容退出工作，从运行总结看来，没有什么问题。由于串联电容或长线路引起的谐波分量问题，在相差动中采用了工频滤波器，虽然在理论分析上似乎有困难，但实际运行效果很好。

在美国，考虑后备保护的主要问题之一是开关拒动。为了缩短开关拒动的保护动作时间，特别注意采用可靠屏蔽的LC回路构成的高精度时间元件和动作与复归均约1~3毫秒的快速电流继电器。前几年开关拒动的后备保护时间为0.15到0.2秒，现在有的系统取为85到100毫秒，即由保护起动开关跳闸到给后一开关励磁的时间约为110毫秒，运行统计良好，没有引起过误动作。

为了对稳定有利，开关三相都是独立操作，一相拒动不影响其他相。最近开始采用开关不对应保护，任一相电流低于例如20毫安，而任一其他相高于例如65毫安时，动作切开被保护开关或后备开关。

开关拒动后备保护都传送远方跳闸脉冲使对侧开关切开。

（3）在西德的超高压线路上，一般逐渐采用两套保护，除了互感器，跳闸线卷，直流等双重化外，还主张用两种不同原理的保护方式。短线路用传达线差动加距离保护。长线路（在西德只有约100~200公里者），则用相差动加距离保护。

西德的半导体距离保护，完全采用四边形特性的阻抗元件如图47。特性过原点的两个

边对第一象限对称。当接入非故障相电压时，该夹角较大。其特点：对顶的斜边考虑了双电源线路短路时引起距离保护所见的故障电阻的相位偏移；特性伸入第四象限，考虑了双电源分歧线故障时，线路距离保护所见分歧线的阻抗的相位偏移；特性的右边线与线路阻抗线的夹角很小，这是考虑当故障距离愈近，短路电流愈大，电弧电阻愈小，当线路末端故障时，弧光电阻愈大，可以改变 X/R 的值以适应长短线路间的配合。

在西欧（包括西德）超高压线路距离保护是三元件式，正常接为接地测量阻抗元件，在两相短路时切换为相间电压及相电流之差，起动元件可作选相元件用。

在西德，由于可用通道受限制，采用一种只需窄频带的相差动方式，即每一2.4千周音频带可用于双回线，在一音频带内的频率分配如图48。

为安全计，采用移频调制。每一相差动连续传送一个频率作为导频，另一频率控制式不同，可用于跳闸或闭锁。

用相序滤过器将三相电流转为单相，例如对380千伏线路，

$$I_1 : I_2 : I_0 = 1 : 3 : 5。$$

相位比较元件的工作方式为脉冲取样，即送端送来的闭锁讯号与受端的窄脉冲讯号比较。为了增加可靠还采用了：电流回路工频滤波；用宽带限幅随之以窄带滤波方式以减少送电线通道出现的脉冲干扰；只是定时限投入工作以防止由于开关断弧时或切开外部故障后电流反相引起的过大干扰所引起的误动作。可以用微波或电力载波（送高频）或地理电缆与架空电缆（直接送音频）通道，据说这种方式已有十年以上经验。

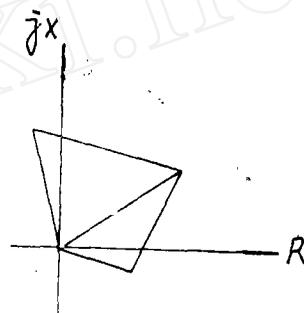


图47

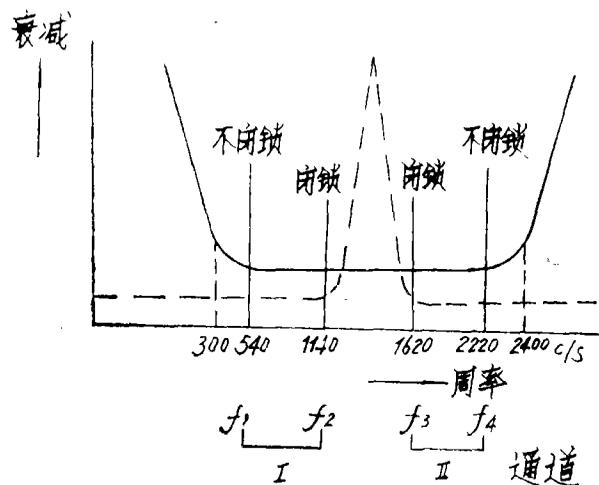


图48

在西欧，220及380千伏线路主要用单相重合闸，而多相故障时不用三相重合闸。在

西德的这些电压等级线路上, 90%装有单相重合闸, 重合成功率约50%, 单相断电时间约1.0到1.2秒。

在超高压长距离线路上采用单相重合闸的限制条件是单相断电后的故障电弧能否自灭和故障相的残余电压升高问题。一般的研究结果认为, 当电弧电流不大于10~20安时可以在0.25秒内自灭。在超高压长线路上一般都装设了补偿电抗器, 用以补偿在线路轻负荷时的线路电容电流, 防止产生工频过电压。

从过电压的观点, 由于非故障相残余电荷的影响, 为了防止发生单相故障进行三相重合闸时的操作过电压, 必须采取措施使线路的残余电荷迅速消失, 例如在短线路上装设绕线式电压互感器, 在补偿电抗器回路短时间串入阻尼电阻开关加装分闸电阻与多级合闸电阻以及控制开关操作程序的装置等等。

在补偿电抗器的中性点装设适当数值的接地电抗, 可以大大降低单相断电过程中的电弧电流和保持故障相电压在很低的水平, 研究与实践结果都证明这是一种保证超高压线路单相重合闸成功的好办法。这个接地电抗只需要通过短时间的电流和正常很小的不平衡电流, 所需要的电压水平(和补偿电抗器中性点的绝缘水平)很低, 因而所费不多。同时在单相重合闸时(与三相合闸于完全放电的线路上相比), 没有什么过电压的问题。需要提及的是, 中性点接地电抗参数的正确选择甚为重要。

在超高压的线路上采用三相重合闸, 由于采用了并联补偿电抗器, 在单相故障三相断开的情况下, 由于非故障相供应能量, 同样也有故障电弧延时自灭的问题。如果双回线同杆架设, 还有由于运行中线路对已断开的故障相感应电压和供应电弧电流这样一些类似的问题。也还有在三相切开后, 并联电抗与线路电容振荡, 其周率为40~70赫, 引起距离元件误动作, 影响重合成功等。这些基本情况, 和中低压线路采用三相重合闸看来有许多不同之处。

在一些国家, 由于线路走廊问题, 同杆架设双回乃至四回超高压线路的情况不少, 有的一个大型原子能电厂就经一同杆双回线接入系统, 考虑到双回线不同相别同时故障的可能性, 力主采用单相重合闸及分相跳闸保护。

还认为采用单相重合闸后, 可以不要地线和地网结构, 500千伏线路每哩可节约一万美元。

西德110千伏系统大部分是补偿接地系统, 除了少数雷害严重地区外, 根本不装自动重合闸。有的个别直接接地的110千伏系统绝大部分可以单相操作, 利用距离起动元件(单一测量元件方式)作选相元件, 实现单相重合闸, 总计结果, 90%以上为接地故障, 故障率为7.76/100公里, 其中绝大部分快速重合成功。

(4) 瑞典计划中的800千伏线路有关继电保护的一些情况。

瑞典400千伏线路主要用三相快速重合闸。计划中的800千伏线路也将如此。但某些幅射线, 长度为100~300公里的, 也可用单相快速重合闸, 但并联电抗器中性点须加小电抗, 同时线路必须换位。

在高度并联补偿的长线路上, 当一相断开(或两相合闸)时, 可能引起共振过电压, 此时应有自动装置将带电的两相断开。

应该采取措施使两侧开关同时切开，这样可以降低暂态过电压的影响。

800千伏线路开关计划用一级电阻，400~500欧，投入10毫秒，可以把并联补偿线路操作过电压降为2倍。

800千伏线路不用相差保护，原因是动作慢，而且所需载波频带宽。采用载波传送允许跳闸的保护方式。为防止暂态误动作，计划动作时间为25~30毫秒。至少两段接地过流作后备。计划中的开关拒动后备时间为0.23秒。线路保护二段时间为0.44秒。

瑞典400千伏网路统计资料，1500公里线路，10个站，每六到七年开关拒动一次。

(5) 其他的一些零星情况。

①对于故障电流中自由分量的影响，据某法国人说，从准确的模拟与实际系统经验证明，用简单的时间常数约2毫秒的RC回路所取得的滤波效果，已足以消除自由分量的影响，从而使精度达3%的精确测量所需时间为15到20毫秒。

②澳大利亚500千伏线路采用相间及接地距离保护。主张双重化的原则是用两套相似，甚至完全一样的保护装置。

③苏联广泛采用相差动保护。对于500千伏长为100~150公里的相差动保护都带有电容电流补偿。他们认为采取这一措施后，实际可以用相差动保护任何长度的线路。用电力载波通道半波比相的相差动保护的理論动作时间约为30毫秒，实际为35~55毫秒。

④除苏联外，一些西欧国家也主张采用电流速断。

二、美、苏超高压线路成套保护的一些具体例子：

(1) 美国AEP系统765千伏线路保护设计，(资料摘自IEEE, PAS, 1969年)。

设计原则是，需要跳闸时可靠跳闸优先于可能的误动作，但也力争防止误动作，例如对于远方跳闸采用“允许”方式，对闭锁方式采用(如果需要)100瓦载波机以取得适当的信杂比。

采用两种不同原理的主保护，闭锁方式及允许跳闸方式。变流器，电压互感器，直流电源，跳闸线卷完全分开。

初期采用一套半导体型，一套机电型，动作时间1周波，采用快速三相重合闸。

相间保护的元件特性，一段为方向阻抗，二段为外抛方向阻抗。

第一套半导体型：用作方向闭锁主保护及距离后备。

第二套机电型：远方允许跳闸主保护及距离后备。

二段整定时间，0.33秒。

接地保护，主要考虑配合可能在后期实现的分相控制开关合闸时间用以降低操作过电压的问题。第一套采用接地距离方向比较主保护，加第一段元件及加时间0.33秒构成后备保护。第二套采用零序电流相差动保护。为了减小半个周波的动作时间，采取传送跳闸的每一半周跳闸方式(不同一般的交替半周闭锁，另半周跳闸的方式)。

(2) 美国TVA系统一条500千伏150公里线路的继电保护(资料摘自IEEE, PAS, 1971年)。

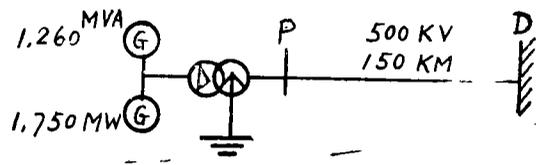


图49

在线路PD上，装有两套独立的相间及接地保护。

1. 一套电磁式的高频闭锁三段式相间距离及另一套电磁式两段式接地距离保护，其阻抗特性分别如图50。

其相间保护，一段直接跳闸，二段经高频闭锁或时间元件跳闸，三段起动发讯并带延时跳闸。只有受电侧（D侧）加了Blinder，为防止在某些地点发生单相接地时的误动作。

其接地保护，一段直接跳闸，二段经高频闭锁式时间元件跳闸。非方向过流起动发讯。且在送电侧（P侧）加了Blinder以防止其不正确动作。

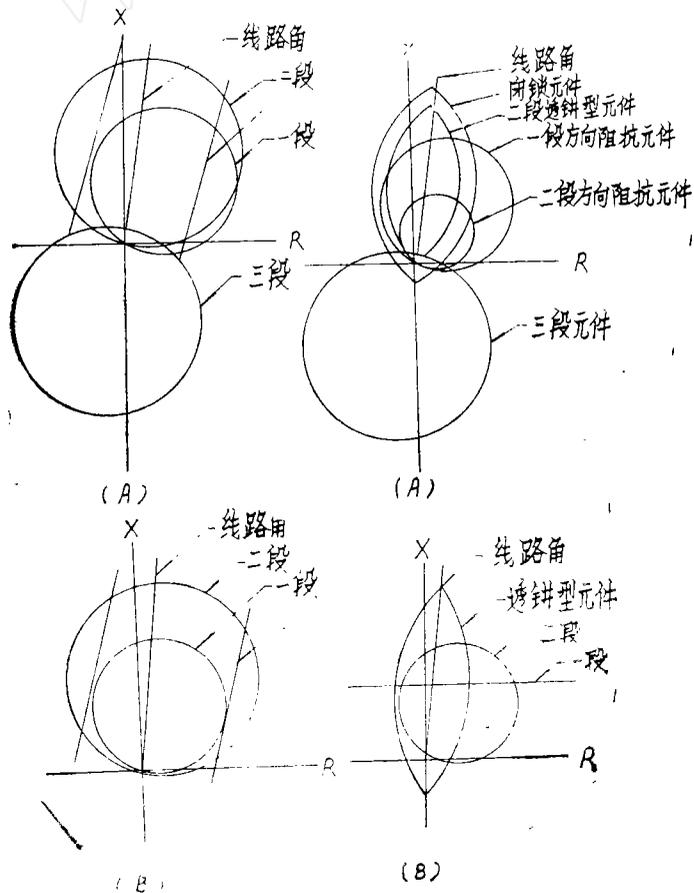


图50：电磁型继电器特性
(A) 相间继电器 (B) 接地继电器

图51：半导体型继电器特性
(A) 相间继电器 (B) 接地继电器

2.另一套半导体式高频闭锁三段式相间距离及另一套半导体式接地距离保护,其特性如图51。

其相间保护,当一段方向阻抗元件与二段方向阻抗元件或与二段透镜形阻抗元件同时动作时,构成瞬时跳闸的一段保护。二段方向阻抗元件或透镜形阻抗元件经高频闭锁或时间元件跳闸。三段起动高频并延时跳闸。

其接地保护,当一段电抗元件、二段方向阻抗元件及透镜形阻抗元件三者同时动作时,构成瞬时跳闸的一段保护,二段方向阻抗元件与透镜形阻抗元件同时动作时,构成二段保护,经高频闭锁或时间元件跳闸。非方向过流起动高频。

在半导体保护中,准备了透镜形特性的振荡闭锁元件,以备在有三相跳闸并快速重合闸时用。此透镜形元件用于当二段在振荡情况下跳开开关时闭锁快速重合闸,但对单相跳闸,单相重合无效。

3.重合闸特点:

(1)相间保护动作时切三相,不重合,起动 p 侧停机。不采用接地故障闭锁方式,完全依靠相间保护本身特性来躲开单相接地时的动作。

(2)单相接地,单相快速重合,断电时间约0.4秒。只用一个合闸继电器。

(3)接地延时跳闸,则跳三相,不重合。

(4)一相切开后,不允许接地继电器起动发讯,使接地二段在两相运行中瞬时跳闸。

(5)一相切开后,运行中两相任一跳闸时,切开两相,取消重合闸。

(6)不考虑两相运行过程中外部故障。

(7)备有停用单相重合闸回路及开关拒动后备保护回路,当 P 侧开关拒动时,停机,取消重合闸,遥切 D 侧。如 P 侧开关经一定时限未合,切另两相,停机,遥切 D 侧,如 D 侧开关不重合,起动后备保护,籍双通道遥切 P 侧机组。

一共在 P 侧及 D 侧线路出口进行了13次 C 相单相人工接地试验,费时9月。前11次完全用电磁型保护,四次跳三相。第一次由于 $Blinder$ 整定不当,一侧延时,故障未消除,之后将重合闸整定时间由20周改为25周,并将 $lelinder$ 接点短路,(因其动作总晚1周),以后正常运行时也不用了,第三次是有意断开补偿电抗器,故障未消除。第四次 P 侧出口故障,线路送940MW, P 侧跳三相。相间保护虽未表示,但分析是它误动作引起。其后在第五、七、九、十及十一次试验时,停 p 侧相间距离,并监视。第十次时,发现 CA 相相间距离在故障开始1周后误动。于是将其延时4周,在第十二、十三次试验时又投入。经分析认为可能是由于二段有记忆作用,而又未如第一段那样改善其暂态特性,二段相间元件在单相接地时有暂态超越,以致误切三相,第八次,线路送690MW, P 侧出口故障, P 侧相间保护投入 P 侧,又跳三相。第十二及十三次试验,半导体型及电磁型保护均投入,故障远端半导体型较电磁型保护动作快2周左右。最后两次试验时,线路均送880MW,用2周开关,全部跳闸时间两次两侧都一样,分别为2.75周及3.00周。断电时间为24.50及24.75周。各次试验两次开关重合时间差均不大于2周,最短的一次(第十三次)为0.75周(60周标准)。

附：由65年到71年中旬，TVA的500千伏线路共发生22次雷击事故，其中20次为单相接地，两次两相接地。

所述线路地线绝缘，用7/8时的间隙，其击穿电压为15~22千伏，此线路每一塔基电阻均小于22欧，只有三个最大的是45，35及24欧。认为接地电阻不会影响保护，

TVA系统的高频闭锁保护运行良好，但用连续讯号的远方跳闸出过好几次莫名其妙的误动作。

(3) 苏联750千伏线路保护(资料摘自国际大电网会议论文集1974年)。

根据500千伏输电系统及在一短的750千伏线路的经验，对750千伏线路的继电保护要求如下：

(1) 主保护动作时间20毫秒。为了系统稳定和限制线路两端不同时跳闸所引起的操作过电压；(2) 不同原理的后备保护，也以同样动作时间保护全线；(3) 除近后备外，还有相间及接地的远后备；(4) 由于故障，切故障及其他操作所引起的严重电磁过渡过程应保证正确动作；(5) 在短路电流变化很大的范围内，保证正确工作；(6) 对瞬间故障，保证自动恢复线路运行。

保护的具体配置如下：

(1) 载波闭锁负序功率方向保护，动作时间不大于20毫秒，在单相重合闸期间切换为传送连续载波电流的半波比相闭锁角为 55° 的相差动保护，动作时间也不大于20毫秒。

(2) 三段式相间距离保护与四段式零序方向电流保护。传送载波允许及跳闸讯号到对侧，作为全线快速保护。

(3) 辅助的瞬时电流速断：(a) 动作区域覆盖方向保护死区的一套。(b) 在双回线上装零序方向横差，以保证接地时瞬时切除一回线。

(4) 专用的开关拒动和变流器与开关间故障的后备保护。

(5) 可控硅辅之以快速出口中间起动开关跳闸线圈，以加速动作。

(6) 利用通用元件实现自动重合闸。

关于电磁过渡过程问题，仍沿用400~500千伏系统用过的用运算微积的分析方法，在某些段串联长达1000公里无串联补偿的线路上，高频分量为125赫及以上。带串联电容时的低频分量为30~45赫。用接入滤波器限制过渡过程的影响，为减小延迟时间，利用专用快速起动元件将比较量在发生故障后才接入滤波器。对分开网路的负序及零序分量，这种零起始状态是自然具有的。

为减少直流分量的影响，采用全部或部分非磁间隙的铁心变流器，正在研究光电变流器及相应的保护与自动装置。

没有考虑直接用相差动的原因是动作时间问题，为达到动作时间为20毫秒，必须用全波比较，需要两个通道，比较复杂。对特长线路，由于载波通道中之一衰减过大，此法可能根本不行。

关于第一套主保护的某些说明：

采用三相比较负序滤波器的理由是：

(1) 整流量不需滤波。

(2) 原则上当故障开始时在滤波器输出端不可能出现反极性脉冲，因而输出不需延时。

(3) 因为三相分开，在故障开始时至少有一相的 u_2 及 I_2 瞬时值有利于快动作。

在三相故障前的不对称故障延续时间大于6~7毫秒，且 u_2 及 I_2 分别大于起动值的三倍时也能可靠动作。

收讯滤波器的频宽为1千周，为保证可靠收到对侧闭锁讯号，出口延时2毫秒已有裕度。

为保证主保护当合闸于故障线路时快速切除，保护设计为当三相线路合闸后由补偿全线电容电流切换为补偿一半，另侧三相全断开时不能起动发讯。当三相不同期合闸时，由于补偿全线电容电流，负序功率方向元件不动作。

关于快速后备保护的补充说明如下：

相间距离保护的第一段为方向阻抗或过原点的四边形特性阻抗，第二三段为四边形特性阻抗如图52。四边形两直边的斜率可调，在合闸及重合闸时，增大第一段或加速第二段以保护全线。考虑在此情况下当电压互感器在线路上时无记忆作用，一段或二段向第三象限偏移，以消除死区。

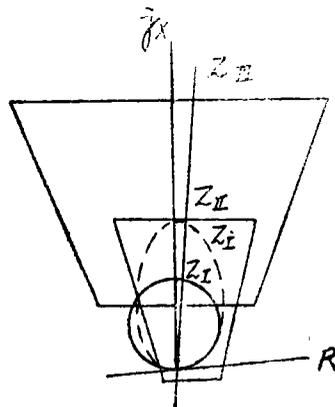


图52

利用负序电流突变量构成快速起动元件作振荡闭锁用并起动磁控接点继电器。

第一段方向阻抗为双桥环流比较绝对值接线，带记忆作用并引入第三相电压。故障后，起动继电器接点将方向阻抗继电器的滤波器接入回路形成比较量。方向阻抗元件最小动作时间10毫秒。

二段及三段阻抗元件采用半波回路比相方式。为防止交、直流回路短暂干扰，带有积分延时元件。

关于重合闸装置，用接于相电压及零序电流补偿相电流的三个透镜形方向阻抗作选相元件。阻抗整定，最大灵敏角 $3I$ 补偿系数及一、三象限偏移均分别可调，在单相重合闸过程中，选相元件长期后加速，或者系统有功率振荡时短时（直到 $3I$ 消失）后加速。在后一情况下，或三相或只是故障相投入工作，选相元件再动作时均切三相，检查有无 $3I_0$ 的电流继电器的复归时间为10毫秒，能躲开变流器二次回路中的直流分量。接地故障时闭锁三相跳闸回路的零序电流继电器的动作时间为10毫秒，用相电流制动躲开两相短路时的不平衡电流，利用非线性回路以获制动特性。同时两种零序电流继电器都要躲开三次谐波电流。