

220~500千伏综合重合闸的选相元件分析

河南省电力勘测设计院 张凤琴

一、概 述

在220千伏以上超高压系统中，选相元件是综合重合闸的重要元件。当线路单相故障时，它应能正确地判别故障相，以实现选相，单相跳闸并重合闸。

关于选相元件，其种类很多，诸如电流选相、低电压选相、方向阻抗选相以及二相电流差突变量选相等。目前，我国220千伏系统中，几乎全部采用方向阻抗选相元件，它在直接金属性短路中，有良好的选相性能。但是，当单相弧光接地或同杆并架双回线不同名故障时，有可能拒动或误选相，因此，有必要探索新的选相元件。

在500千伏综合重合闸中，采用了二相电流差突变量选相元件，其性能优于方向阻抗元件，但仍不能解决同杆并架双回线的选相问题。

现就方向阻抗选相元件及二相电流差突变量选相元件，在各种运行状态下的动作性能讨论如下。

二、单相短路时，方向阻抗选相元件的动作状况

1. 无弧光电阻，经 $K3I_0$ 补偿后的测量阻抗：

保护安装处的母线电压

$$U_{1s} = Z_{1l} (I_s + K3I_0)$$

流入继电器的电流

$$I_{1s} = I_s + K3I_0$$

则继电器的测量阻抗：

$$Z_{1s} = U_{1s} / I_{1s} = Z_{1l}$$

与故障距离成正比，所以能正确选相。

2. 计及弧光电阻时，继电器的测量阻抗：

设单电源线路，经弧光电阻接地，

$$U_{1s} = U_{xs} + Z_{1l} (I_s + K3I_0)$$

$$= I_s R_{rs} + Z_{1l} (I_s + K3I_0)$$

$$I_{1s} = I_s + K3I_0$$

$$Z_{1s} = U_{1s} / I_{1s} = Z_{1l} + \frac{I_0}{I_s + K3I_0} R_{rs}$$

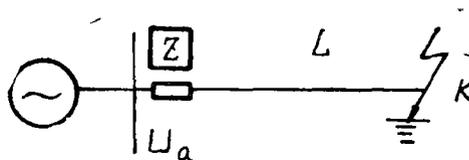


图 1

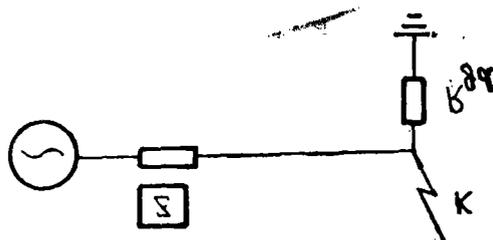


图 2

可以看出，测量阻抗中包含有电阻分量，当整定阻抗较小时，有可能造成选相元件

拒动。

3. 有助增并计及弧光电阻时的测量阻抗:

如图 3 所示, 相邻线出口经 R_{gd} 单相接地,

设保护安装处的母线电压为 U_ϕ ,

$$U_\phi = U_1 + U_2 + U_0$$

$$U_1 = U_{1K} + I_1 Z_1$$

$$\text{其中: } U_{1K} = I_1' R_{gd}$$

$$U_2 = U_{2K} + I_2 Z_2 \quad U_{2K} = I_2' R_{gd}$$

$$U_0 = U_{0K} + I_0 Z_0 \quad U_{0K} = I_0' R_{gd}$$

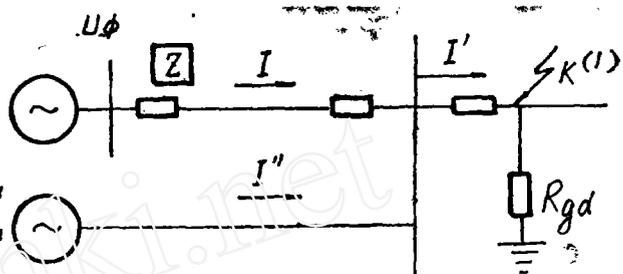


图 3

$$\therefore \text{短路点 } I_1' = I_2' = I_0'$$

$$\therefore U_\phi = I_1 Z_1 + I_1' R_{gd} + I_2 Z_2 + I_2' R_{gd} + I_0 Z_0 + I_0' R_{gd}$$

$$= I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0 + 3I_1' R_{gd}$$

$$= Z_1 (I_\phi + K3I_0) + 3K_{PI} I_1 R_{gd}$$

$$\left(\text{其中 } K_{PI} = \frac{I_1'}{I_1} \right)$$

$$Z_\phi = U_\phi / (I_\phi + K3I_0) = Z_1 (I_\phi + K3I_0) + 3K_{PI} I_1 R_{gd} / (I_\phi + K \cdot 3I_0)$$

$$= Z_1 + K_{PI} \frac{I_\phi}{I_\phi + K \cdot 3I_0} \cdot R_{gd}$$

$$\therefore K_{PI} > 1$$

\therefore 有助增情况下, 测量阻抗增大得更多。如按线末有灵敏度整定时, 则此情况下, 选相元件拒动机率更大。为了保证选相元件的正确工作, 往往需要扩大其动作特性圆, 降低灵敏度。根据系统运行经验, 一般:

200~300km 灵敏度取 $k_\phi = 1.5$

100~200km 灵敏度取 $k_\phi = 2$

100km以下 灵敏度取 $k_\phi = 2.5$

如此整定, 在线末经 20 欧姆接地短路时, 距离选相元件至少能相继动作。但有时, 接地电阻大于 20 欧, 故相继动作的可能性是存在的。特别是短线路, 弧光电阻对其出口故障的影响很大, 严重情况下, 将导致选相元件拒动。

对于 500 千伏电网, 要求更快地切除故障 ($> 0.10''$) 实际上, 阻抗选相已不能满足要求, 故必须采用新的性能优良的选相元件——即二相电流差突变量选相元件。

三、二相电流差突变量选相元件的动作分析

1. 二相电流差突变量选相元件的动作原理:

二相电流差突变量选相元件由电流突变量桥、整流桥、RC 直流桥及触发器构成, 见图 4 所示。

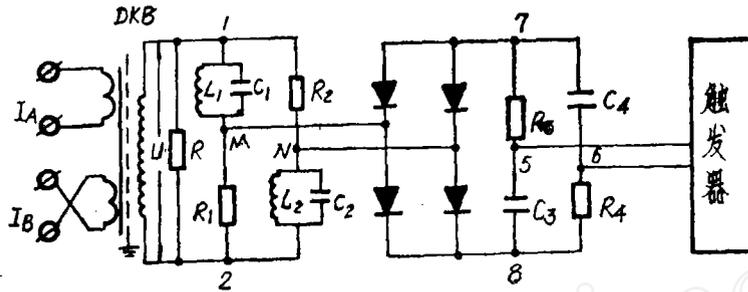


图 4

由于该元件只反应短路瞬间的暂态电流变化值，对其工作状态，本应按暂态过程来分析。下面的分析仅概略地说明二相差电流元件的动作原理。

正常运行及稳态时，令谐振桥（即突变量桥）平衡，则其输出 $U_{MN} = 0$

在发生短路的瞬间，设输入电压由 $U_1 \rightarrow U_2$

即 $U_1 = U_{1M} + U_{R1} = U_{R2} + U_{N2}$ 因电容上电压不能突变

$$\text{故 } U_2 = U_{1M} + (U_{R1} + \Delta U) = (U_{R2} + \Delta U) + U_{N2}$$

$$U_2 - U_1 = [U_{1M} + (U_{R1} + \Delta U)] - (U_{1M} + U_{R1}) = \Delta U$$

$$\begin{aligned} U_{MN} &= (U_2 - U_{C1}) - (U_2 - U'_{R2}) \\ &= U'_{R2} - U_{C1} = (U_{R2} + \Delta U) - U_{C1} \\ &= \Delta U \end{aligned}$$

$$\therefore U_{MN} = U_2 - U_1 = \Delta U$$

设短路前，电流为 I_1 ，短路后为 I_2 则电流差：

$$\Delta I = I_2 - I_1 \text{ 或 } I_2 = \Delta I + I_1$$

由上看出，输入电压的变化量全部用以输出，或者说，突变量桥的输出电压，由短路初始电压的变化量决定之。即突变量桥按 ΔI 确定动作值，而与稳态电流的大小无关。

为提高装置的抗振荡能力，装置设置了 R、C 直流桥。它由制动支路 R_3 、 C_3 及动作支路 R_4 、 C_4 组成。

短路发生时，由于电容上电压不能突变而电阻上电压可以改变，使 $U_{0.8} \neq U_{0.8}$ ，而直流桥动作输出 $U_{0.8}$ 。系统振荡时，振荡速度由慢变快，电流由小变大，因而，突变量桥的输出也由小变大，同时，R、C 直流桥的制动电压 $U_{0.8}$ （电容上电压）不断积累以致大于动作电压 $U_{0.8}$ ，保证了继电器可靠制动，且振荡越快，制动电压的积累越快，装置的抗振荡能力越强。

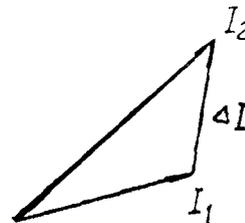


图 5

2. 全相运行发生各种故障时, 装置的动作分析:
这种分析是基于短路瞬间, 系统综合正序阻抗 ΣZ_1 等于系统综合负序阻抗。因为理论分析及运行实践都证明, 在故障发生的暂态过程中, 各主要电气设备的正序阻抗可以认为与负序阻抗相等。

1) 单相短路时, 其向量图如下所示:

在短路初瞬, 系统三相完全处于对称状态, A相故障电流通过互感在非故障相B、C中的感应电流是相等的, 因之, 对于非故障相:

$$\begin{aligned} dI_{BC} &= d(I_B - I_C) \\ &= d[(I_{B1} + I_{B2} + I_{B0}) - (I_{C1} + I_{C2} + I_{C0})] \\ &= d[(a^2 I_{A1} + a I_{A1} + I_{A0}) - (a I_{A1} + a^2 I_{A1} + I_{A0})] \\ &= 0 \end{aligned}$$

对于故障相:

$$\begin{aligned} dI_{AB} &= d(I_A - I_B) = d[(I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}) - (I_{B1} + I_{B2} + I_{B0})] \\ &= d[(I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}) - (a^2 I_{A1} + a I_{A1} + I_{A0})] \\ &= d[3I_{A1} - (a^2 + a + 1)I_{A1}] = d \cdot 3I_{A1} \\ &= -dI_{KA} \end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned} dI_{CA} &= d(I_C - I_A) = d[(I_{C1} + I_{C2} + I_{C0}) - (I_{A1} + I_{A2} + I_{A0})] \\ &= dI_{KA} \end{aligned}$$

∴ 单相接地短路时, 与故障相相连的两个选相元件能动作, 非故障相选相元件不动作。

2) 两相短路接地:

设B、C短路并接地, 其电流向量图见图7所示。

$$\begin{aligned} dI_{BC} &= d(I_B - I_C) = d[(a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_{A0}) \\ &\quad - (a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_{A0})] \\ &= d[(a^2 I_{A1} - \frac{a}{2} I_{A1} - \frac{1}{2} I_{A1}) \\ &\quad - (a I_{A1} - \frac{a^2}{2} I_{A1} - \frac{1}{2} I_{A1})] \end{aligned}$$

$$= d(\frac{3}{2} a^2 I_{A1} - \frac{3}{2} a I_{A1}) = d \frac{3}{2} I_{A1} (a^2 - a) = d \frac{3}{2} \sqrt{3} I_{A1}$$

$$dI_{AB} = d(I_A - I_B) = d[(I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}) - (a^2 - \frac{a}{2} - \frac{1}{2}) I_{A1}]$$

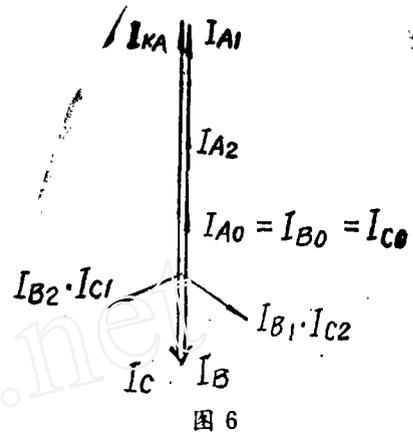


图6

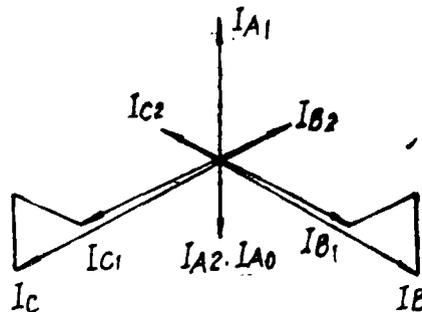


图7

$$= -d\left(a - \frac{a^2}{2} - \frac{1}{2}\right) I_{A1}$$

$$dI_{CA} = d(I_C - I_A)$$

$$= d\left(a - \frac{a^2}{2} - \frac{1}{2}\right) I_{A1}$$

∴ 二相短路或二相短路接地时，三个选相元件都动作。

3) 对称三相短路，见图 8 所示。

$$dI_{AB} = d(I_A - I_B) = \sqrt{3} I_{A1} e^{j30^\circ}$$

$$dI_{BC} = d(I_B - I_C) = \sqrt{3} I_{A1} e^{-j90^\circ}$$

$$dI_{CA} = d(I_C - I_A) = \sqrt{3} I_{A1} e^{j150^\circ}$$

∴ 三个选相元件都动作。

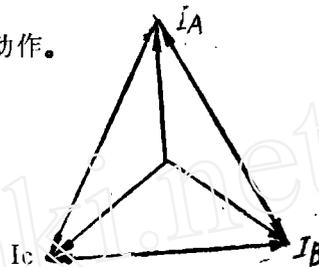


图 8

兹将各种故障情况下选相元件动作情况列表如下

表 1

故障类型	相别	选相元件		
		$d(I_A - I_B)$	$d(I_B - I_C)$	$d(I_C - I_A)$
(1) K	A	+	-	+
	B	+	+	-
	C	-	+	+
K (1.1) 或 K (2)	AB	+	+	+
	BC	+	+	+
	CA	+	+	+
K (3)	A、B、C	+	+	+

结论：①只有单相故障时，两个选相元件动作。

②各种相间故障时，三个元件都动作。

③二相电流差突变选相元件在单相故障时能正确选相。

3. 二相运行再故障时的动作情况：

1) 二相运行状态：是一相断开后的非全相状态，这种情况出现在单相故障跳闸和重合的过程中，为了稳定需要，有时候也要求二相运行。

设 B、C 二相运行，向量图见图 9 所示。

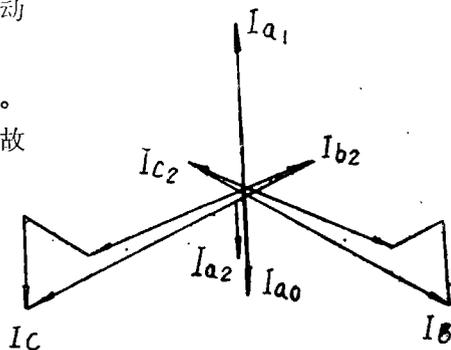


图 9

故障相 $I_b = 0$

非故障相 $I_a = a^2 I_{b1} + a I_{b2} + I_{b0}$

$I_c = a I_{b1} + a^2 I_{b2} + I_{b0}$

可以看出，两相运行中出现了各序电流。但在两相运行的稳态中，突变量选相元件不能反映它们。

当单相故障跳闸重合于永久故障时，选相元件仍能正确地判断故障相。

2) 两相运行再故障时：

选相元件的动作情况如下表示：

表 2

选相元件	故障类型			
	$K_P^{(1)}$	$K_C^{(1)}$	$K_{B,C}^{(1,1)}$	$K_{B,C}^{(2)}$
$d I_{AB}$	+	±	+	+
$d I_{BC}$	+	+	+	+
$d I_{CA}$	±	+	+	+

小结：

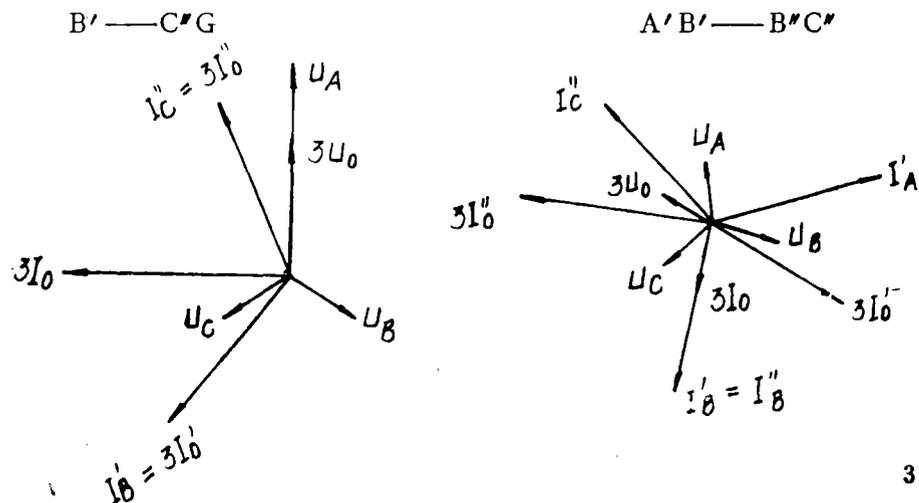
①二相运行中再发生单相故障时，则与故障相有关的选相元件能动作，另一元件处于可动、可不动状态，这取决于互感在非故障相中感应的电流大小而定。

②二相运行中再发生相间故障时，三个选相元件都能动作。

4. 同杆并架双回线的选相问题：

为了提高传输容量、节省钢材和出线走廊、加快建设速度，近年内，在高压和超高压系统中，国内陆续出现双回线同杆并架的出线方式。它的出现，对零序电流保护和重合闸的选相元件提出了更高的要求。就选相元件而言，必须适应各种运行方式下的各种故障，确保正确选相和按相跳闸，以实现组合全相运行方式。

为此，首先应了解双回线跨线故障的性质，现绘出各种跨线故障的电压、电流向量图见图10、图11所示。



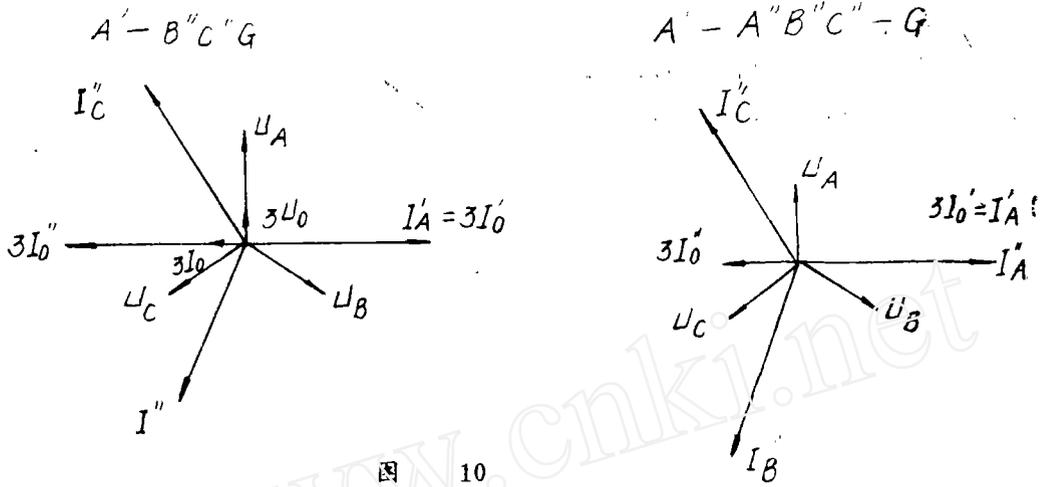


图 10

1) 电压、电流向量图, 设双回线的各量分别以 A' 、 B' 、 C' 及 A'' 、 B'' 、 C'' 表示, 图中 $3I_0$ 为两线 $3I_0'$ 及 $3I_0''$ 的向量和。

2) 用序分量表示跨线故障, 分别绘出不同故障下双回线的各序分量, 并进行向量相加, 求出双回线的合成各序分量电流。图中, I'_{a1} 、 I'_{a2} 、 I'_{a0} 及 I''_{a1} 、 I''_{a2} 、 I''_{a0} 分别为 I、II 线的正、负、零序电流而 I_{A1} 、 I_{A2} 、 I_{A0} 为合成 A 相正、负序及零序电流。

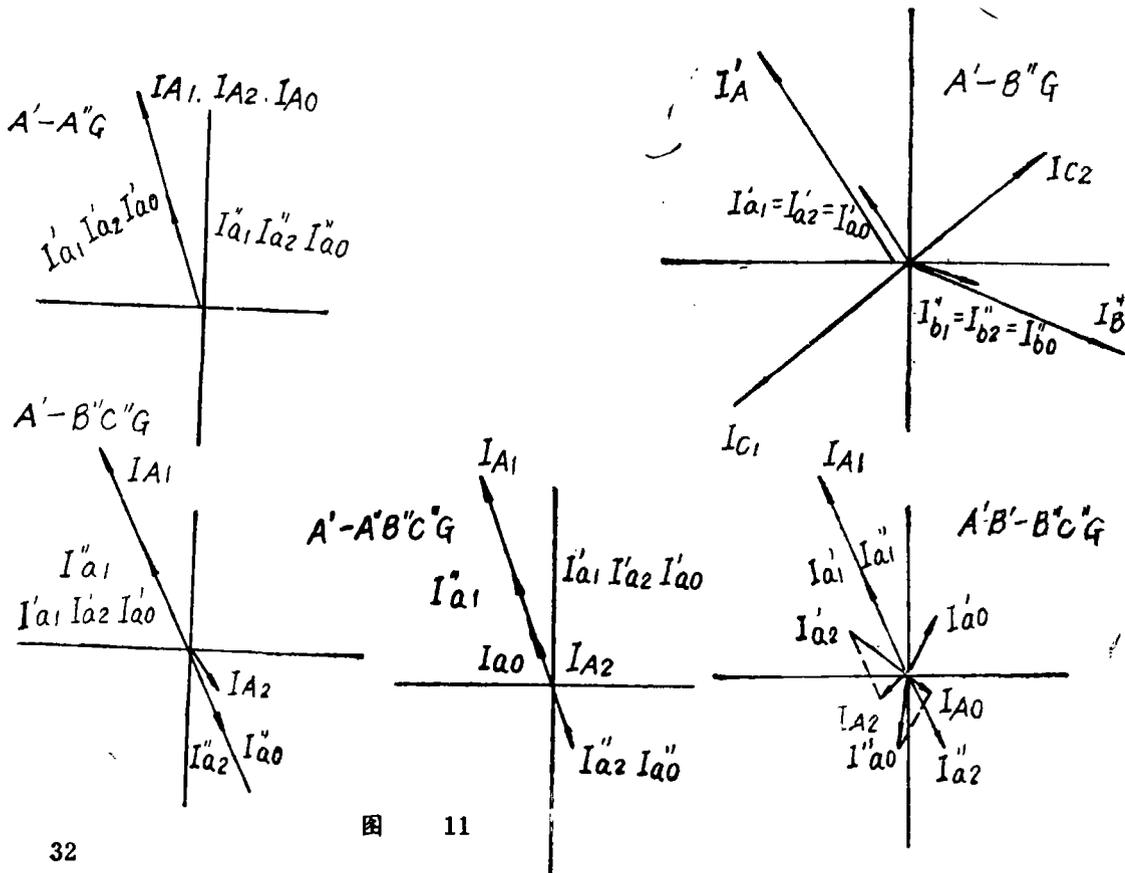


图 11

从向量图看出：同名相跨线故障，与各线分别故障相当，不同名跨线故障，多具有相间故障性质；其组合三相电压对称且正序分量电流远大于负序和零序分量电流。如双回线均采用阻抗选相元件，而定值按线末有一定灵敏度整定时，则跨线故障中，它很可能误选相。由A'B''G故障的向量图、组合C相电流 $\dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} \approx 0$ ，相当于A、B相间故障。跨线故障的计算表明，同杆双回路异名相故障与相间故障相当。

双回路同杆架设时，由于零序互感的影响，使测量阻抗增大为：

$$Z_1 = Z_L + \frac{I_0'}{I_A + kI_0} \cdot Z_{0M}$$

若接地阻抗元件的整定阻抗使线末故障的灵敏度为1.5，既使用合成零序电流加以补偿，选相元件仍可能感受到相间故障，两回线的继电器均动作，造成双线全被切除的严重后果。

采用二相电流差突变选相元件，仍不能解决跨线故障中的误选相问题。现以某地同杆并架双回线的A'B''故障为例说明如下：

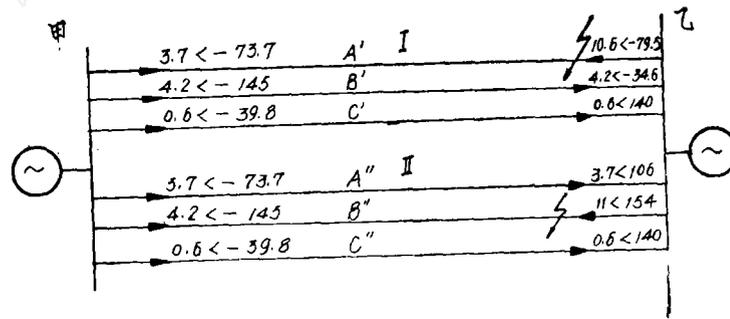


图12

甲侧向量图见图13a所示

乙侧向量图见图13b所示

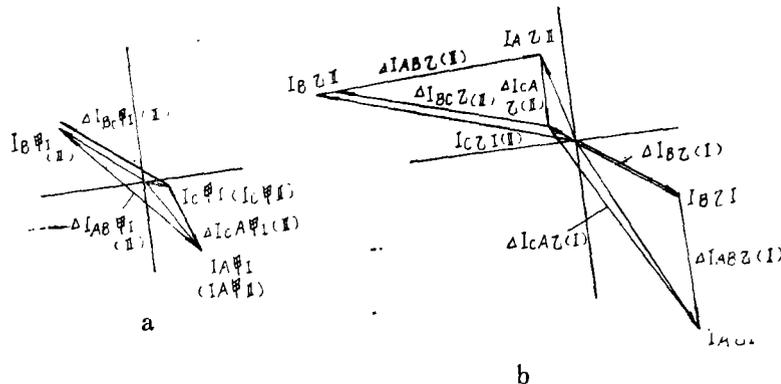


图13

从图中看出：A'B''故障，无论甲侧或乙侧，电流突变量 dI_{AB} 、 dI_{BC} 、 dI_{CA} 均大于0，故双回线A、B、C三个选相元件都能动作，无法选出故障相，双回线都可能被切除。

所以,无论接地阻抗元件或二相电流差元件,都解决不了同杆双回线的选相可靠性问题。对同杆双回线,为提高运行可靠性,实现组合全相运行方式,提高系统稳定水平必须探索具有新型原理的选相元件或研制新型具有选相能力的保护装置,诸如分相相差高频(特高频)保护,分相横差(或平衡)保护等等。

四、几点看法:

1)如上所述,采用二相电流差突变量选相元件,动作速度快、灵敏度高,能明确地选相,对电阻的反应能力强,因而,近年来被应用在500千伏系统中,效果良好。但是,电流选相依然有局限性,如对同杆并架双回路不能从根本上解决选相问题。

2)我国220千伏系统保护配置中,广泛应用阻抗选相。其突出特点是:重合闸功能很全,能选相,能进行跳闸选择,能直接作用于断路器,相应地,接线也很复杂。相差高频、三段距离四段零序等保护均无选相能力,他们只能经重合闸出口,因之,保护与重合闸密不可分。

这种情况,在220千伏系统中基本能满足运行要求。主要原因是220千伏大都采用单母线或双母线接线方式,保护、重合闸与开关一一对应,二次回路清晰,运行可靠性高。

3)随着系统发展,超高压线路及大容量机组的出现,500千伏电网逐步形成。

目前,国内建设的500千伏变电站,大多采用1 $\frac{1}{2}$ 断路器接线方式。任何故障情况下,都不会造成全所停电。由于中间断路器公用,一套线路保护须作用于两台断路器,故需两套重合闸。为使二次回路不过分复杂,重合闸本身要简化,并减少它与保护之间的联系。近年来,我国研制的集成电路系列500千伏保护中,重新划分了保护及重合闸的功能:重合闸只管重合接线较简单,保护除本身应有的保护作用外,尚能选相,选择跳闸方式等。这样,就能较好地适应1 $\frac{1}{2}$ 断路器接线方式。

已经国家鉴定的500千伏晶体管和整流型保护,吸取了220千伏系统保护的运行、设计及制造经验,能很好地应用于双母线接线方式。如用于1 $\frac{1}{2}$ 断路器接线,只要对二次回路稍加改造并取得必要的运行经验即可。

总之,对超高压系统,为满足稳定要求而采用的综合重合闸,关键在于有良好性能的选相元件。对500千伏系统,应简化重合闸、增强保护功能。而220千伏系统,除方向阻抗选相外,对于不同接线和各种运行方式,还应采用不同的选相元件。必要时,也可研制分相保护以简化重合闸。

参考文献

1. JZC——501综合重合闸装置说明书 水电部南京自动化研究所
2. 220千伏徒蓊通同杆并架双回路复故障计算及保护装置的改进意见
北京电力设计院