

# 500kV集成电路线路保护的研制

许昌继电器研究所 刘甲申 执笔

## 一 概 述

从1986年开始,我们从西德“SIEMENS”公司引进了交流500kV成套线路保护装置技术。这套线路保护(包括7SD—32相差高频保护,7SL—32/C距离保护,7SN—20零序电流方向保护,7VK—19重合闸等)具有先进的制造工艺和合理的结构,是目前国际上比较先进的保护。

但是引进的保护原理设计比较复杂,也不符合我国“四统一”要求,而且价格也十分昂贵,在国内推广比较困难,为此,在消化吸收引进产品先进合理部份的基础上,结合我国的国情,研制出一套适合我国电力系统实用可靠的新一代保护产品,实在是非常必要的。

从1988年开始,许昌继电器研究所与华中理工大学共同开发研制500kV超高压输电线路集成电路保护装置,我们仔细研究引进产品的有关原理,消化吸收其优点,并结合我国的国情,保留我们研制使用多年的晶体管线路保护装置简单适用的特点,以总结了我国电力系统多年运行经验的“四统一”产品(ZCG—21<sub>x</sub>晶体管相差高频保护,ZJL—21<sub>x</sub>晶体管距离保护,ZLF—21<sub>x</sub>晶体管零序电流方向保护,ZZC—21<sub>x</sub>晶体管综合重合闸装置)为基础,新研制出ZCG—45集成电路相差高频保护,ZJL—45集成电路相间距离保护,ZJL—46集成电路接地距离保护,ZLF—45集成电路零序电流方向保护,ZXX—45集成电路选相装置,ZCH—45集成电路重合闸装置等产品,新研制的集成电路保护与SF—500集成电路收发信机配合。可构成500kV超高压输电线路的成套保护装置。

## 二 保护装置的设计原则

1. 由于500kV线路与220kV线路相比,有其本身的特点,但根据国内运行的500kV线路保护情况以及“四统一”动模试验,证明两部“四统一”设计只要在保护配置上适当,基本上满足500kV线路保护的要求,所以本套保护各装置仍以“四统一”框图为主要框图。

2. 装置的技术要求,以“四统一”主要技术要求为标准,但某些指标例如整组动作速度,精工电流等有较大程度的提高。

3. 增加了接地距离保护,接地距离阻抗测量元件采用新型的以 $I_0$ 为极化量及逻辑

转换的方案，大大地提高了受端保护耐受过渡电阻的能力。同时配置零序电流方向保护，可供灵活选用。

4. 接地距离保护与相间距离保护分别独立，相间距离测量元件采用圆特性的方向阻抗，并实行各段独立，阻抗元件采用平均值比较和双半波与门比相，以获得较快的动作速度和较小的超越。

5. 相差高频可以配单频率收发信机，为了提高动作速度，也可以配合双频率收发信机，实现正、负半周比相工作方式。

6. 选相跳闸装置适用于500kV输电线路一个半开关接线，每套装置可以跳开两个断路器，既可与各种保护构成可分相跳闸的保护，也可与ZCH—45重合闸构成综合重合闸装置。

### 三 保护装置的工作原理

#### 接地保护

##### 1. 接地距离保护

采用了新型的以 $I_0$ 为极化量的接地阻抗，这种阻抗元件耐受过渡电阻的能力很大，试验证明可达10倍甚至更多倍数于整定阻抗，尤其在受端，当过渡电阻很大时，常规的 $I_C$ 极化，阻抗元件会误判断，而这种阻抗元件能利用本身设置的控制线，正确作出故障判别。

接地阻抗元件主要由电抗线(X)，方向线(D)、负荷线(R)构成，其动作特性为近似开口四边形特性，如图1所示：

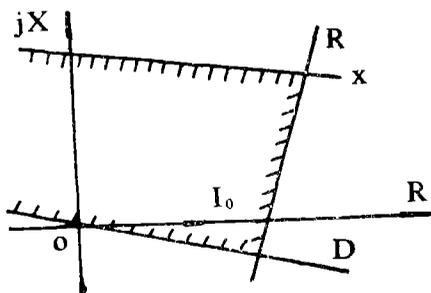


图 1

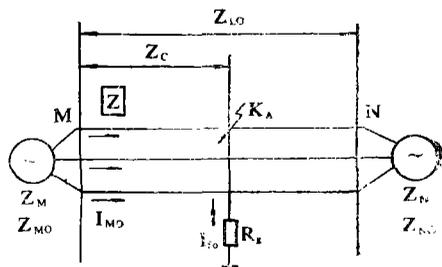


图 2

##### ①电抗线(X)的构成原理

以双侧电源系统为例，假定系统阻抗与线路阻抗的阻抗角相等，零序电流及正、负序电流分布系数相等，保护安装在M侧，如图2所示，当发生 $K_A^{(1,0)}$ 故障，于是在M侧可得到：

$$A \text{相电压 } \dot{U}_{M\alpha} = (\dot{I}_\alpha + 3K\dot{I}_{M0})Z_L + 3\dot{I}_f R \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{A相补偿电压} \quad \dot{U}'_{M_a} &= \dot{U}_{M_a} - (\dot{I}_a + 3K\dot{I}_{M_0})Z_D \\ &= (\dot{I}_a + 3K\dot{I}_{M_0})(Z_L - Z_D) + 3\dot{I}_{f_0}R_g \quad (2) \end{aligned}$$

其中:  $K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ ,  $Z_0$ 、 $Z_1$ 为线路单位序阻抗

$Z_L$ 为故障点到保护安装处的线路阻抗

$Z_D$ 为整定阻抗。

$I_0$ 极化接地阻抗继电器的动作方程为:

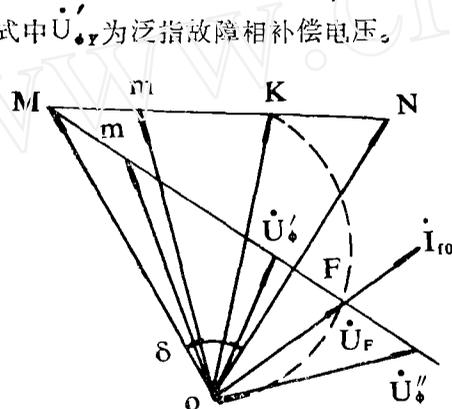
$$90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{M_a}}{\dot{I}_{M_0}} \leq -90^\circ \quad (3)$$

### ②保护动作特性分析

图3表示保护处于送、受端时动作行为为向量图,在图3中 $\vec{OM}$ 、 $\vec{ON}$ 分别是系统两端电源电势,  $\vec{OK}$ 为故障前短路点处的电压,  $\vec{om}$ 为故障前保护安装处的电压,  $\vec{om}'$ 为故障后保护安装处的电压,由于 $\vec{Fm}'_1$ 为故障线路上的压降,  $\dot{U}_F$ 为接地电阻 $R_g$ 上的故障电压,由于 $\dot{U}_F = 3\dot{I}_{f_0}R_g$ ,所以 $\dot{U}_F$ 与 $\dot{I}_{f_0}$ 同相位,动作方程理论上应为:

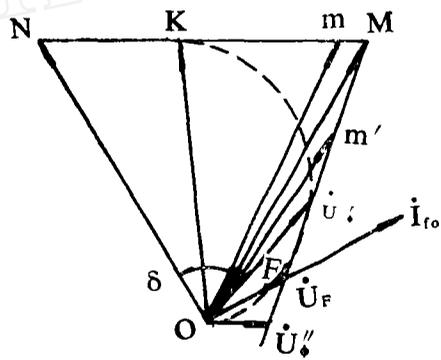
$$90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{\phi Y}}{\dot{U}_F} \leq -90^\circ \quad (4)$$

式中 $\dot{U}'_{\phi Y}$ 为泛指故障相补偿电压。



(a) 送端 图3

当保护处于送端时,如图3(a)故障发生在区内时,  $Z_L < Z_D$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}''_{\phi}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 恒落后于 $\dot{U}_F$ ,保护正确动作;故障发生在区外时,  $Z_L > Z_D$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}'_{\phi Y}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 恒超前于 $\dot{U}_F$ ,保护不动,而且从图中可以看出,无论过渡电阻 $R_g$ 增到多大,上述关系都是正确的,因



(b) 受端 $R_g$ 较小时

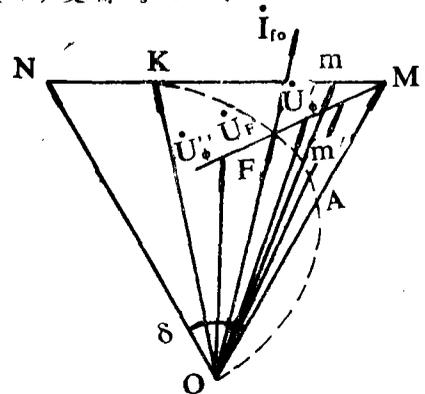


图3(c) 受端 $R_g$ 较大时

此过渡电阻对送端保护的動作情况没有什么不利的影响。当保护处于受端且 $R_g$ 比较小时,如图3(b)故障发生在区内时, $Z_L < Z_D$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}''_{\phi Y}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 恒落后于 $\dot{U}_F$ ,保护正确动作;故障发生在区外时, $Z_L > Z_D$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}'_{\phi}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 超前于 $\dot{U}_F$ ,保护不动,但当过渡电阻 $R_g$ 大到一定程度,如图3(C)中的A点,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 与 $\dot{U}_F$ 同相位,致使保护处于临界状态,当 $R_g$ 再增大时,故障发生在区内,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}''_{\phi Y}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 超前于 $\dot{U}_F$ ,保护拒动;故障发生在区外,  $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}'_{\phi}$ ,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 落后于 $\dot{U}_F$ ,保护超越误动,由此可见,保护处于受端时,当 $R_g$ 增大到使 $\dot{U}'_{\phi Y}$ 越过A点,原动作判据失效,若将动作方程判据完全颠倒过来,就可以解决受端过渡电阻较大时,区内故障拒动,区外故障超越的现象。

由于补偿电压 $\dot{U}'_{\phi Y} = \dot{U}_{Ma} - (\dot{I}_a + 3KI_{MO})Z_D$ , 以及

$\dot{U}''_{\phi Y} = U_{Ma} + (\dot{I}_a + 3KI_{MO})Z_D$ 在各种接地故障情况下有如表中所示的内在联系。即:区内故障时,  $\dot{U}'_{\phi Y}$ 和 $\dot{U}''_{\phi Y}$ 有一个超前 $\dot{U}_F$ , 另一个必滞后 $\dot{U}_F$ ; 见表1所示。

表 1

与 $\dot{U}_F$ 的相位关系	故障情况		受端			
	送端		$R_f < R_{fA}$			
	区内	区外	$R_f < R_{fA}$		$R_f < R_{fA}$	
补偿电压			区内	区外	区内	区外
$\dot{U}'_{\phi Y}$	滞后	超前	滞后	超前	超前	滞后
$\dot{U}''_{\phi Y}$	超前	超前	超前	超前	滞后	滞后

区外故障时, 两者的相位是一致的。因此引入动作方程:  $90^\circ \leq \text{Arg} \frac{\dot{U}'_{\phi Y}}{\dot{U}_F} \leq -90^\circ$

作为辅助判据, 采用该方程和方程(4)相异的办法, 作为保护的動作判据, 从而大大提高了受端保护耐受过渡电阻的能力。

接地阻抗见框图4所示。

④零序电抗(x)元件的构成所示。

电抗线的补偿电压:

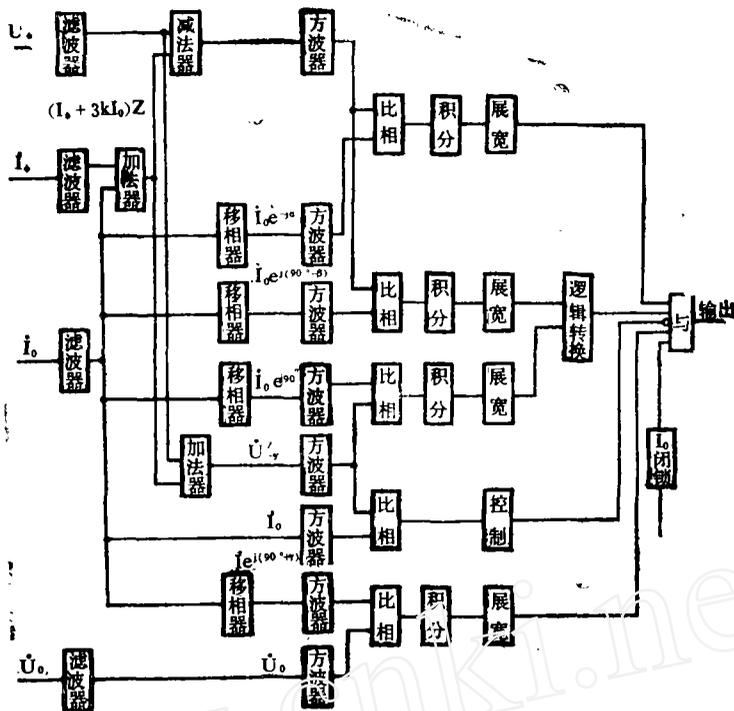
$$\dot{U}'_Y = K\dot{U}_\phi - (\dot{I}_\phi + 3KI_0)x$$

极化量:  $3I_0 e^{j(\alpha_0 - \beta)}$

动作方程:

$$90^\circ \leq \text{Arg} \left[ \frac{\dot{U}'_Y}{3I_0 e^{j(\alpha_0 - \beta)}} \right] \leq -90^\circ \quad (5)$$

式中:  $\beta$ 为克服区外超越取的下偏角。



框图中:  $\dot{U}_\phi$  为故障相电压;  $\dot{I}_\phi$  为故障相电流;

$\dot{U}_0$  为零序电压;  $\dot{I}_0$  为零序电流

$\dot{U}'_y = K\dot{U}_\phi - (\dot{I}_\phi + 3K\dot{I}_0) \times$  为电抗线补偿电压;

$\dot{U}''_y = K\dot{U}_\phi + (\dot{I}_\phi + 3K\dot{I}_0) \times$  为控制线补偿电压;

图4 接地阻抗方框图

控制线的补偿电压:

$$\dot{U}'_y = K\dot{U}_\phi + (\dot{I}_\phi + 3K\dot{I}_0) \times$$

极化量:  $3I_0 e^{j(90^\circ - \theta)}$

动作方程:

$$90^\circ \leq \text{Arg} \left[ \frac{\dot{U}'_y}{3I_0 e^{j(90^\circ - \theta)}} \right] \leq -90^\circ \quad (6)$$

$\beta$  同上。

继电器安装于双侧供电的送端或单侧供电时, 控制线不起作用, 其电压向量图参阅图5所示, 阴影部分为其动作区。

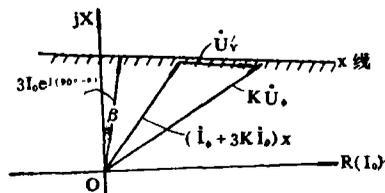


图5

继电器安装在双侧供电系统的受端时，其在阻抗平面上的动作特性如图6所示：

图中①、②分别为电抗线与控制线，两者的异或构成继电器的动作区域。由此可见，其在受端耐过渡电阻的能力可以非常大。

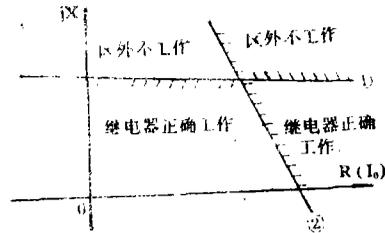


图6

### ⑤ 负荷限制线的构成

$$\text{补偿电压: } \dot{U}_V = K \dot{U}_0 - (\dot{I}_0 + 3K\dot{I}_{10})R$$

$$\text{相位电压: } \dot{U}_0 \approx I_0 e^{-j}$$

$$\text{动作方程: } 90^\circ \leq \text{Arg} \left[ \frac{\dot{U}_V}{3I_0 e^{-j\alpha}} \right] \leq -90^\circ \quad (7)$$

式中 $\alpha$ 为负荷限制线倾斜的角度。

参阅图7的电压向量图。

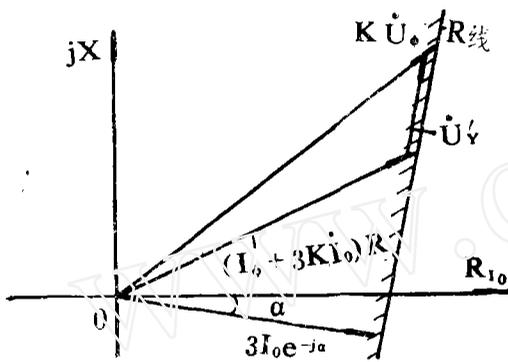


图7

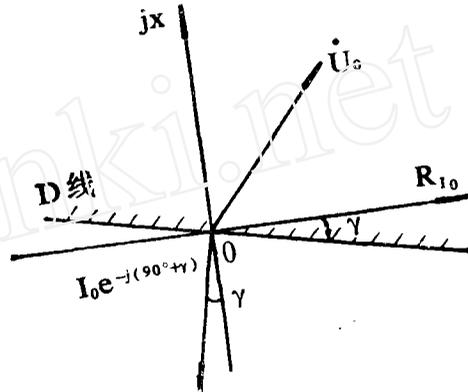


图8

### ⑥ 方向线 (D元件) 的构成见图8所示

$$\text{动作方程: } 90^\circ \leq \text{Arg} \left[ \frac{\dot{U}_0}{I_0 e^{-j(90^\circ+\gamma)}} \right] \leq -90^\circ \quad (8)$$

上述开口四边形特性的接地阻抗元件，经动模和静模试验表明，耐受过渡电阻能力很大，受端超越较小，取得了预期的设计效果。

接地距离保护中设置了相电流差突变量元件以及两相接地故障选相元件，两者相互配合，能正确反映单相接地故障和两相接地故障。

## 2. 零序电流方向保护

运行实践证明，零序电流方向保护在高压电网中发挥着重要作用，尽管受运行方式的影响，整定复杂，但由于其构成简单，动作几率大，可靠性高等优点，零序电流方向保护仍不失为各种高电压等级高压电网接地故障的基本保护，因此在本设计中，仍设置了零序电流方向保护，供用户选用。

该设计中,作为零序电流方向保护的主要功率方向元件,其交流电压可以是内制 $3U_0$ 方式提供,也可以外接 $3U_0$ 直接提供,采用方波比相方式构成方向元件,为了改善方向元件的动作特性,提高动作可靠性,加快元件的动作及返回速度,采用了充电式积分电路,积分时间正、负半周共用,所以元件的不明确区很小,比相部分采用正、负半周比相加快了元件的动作速度。

### 相间距离保护

阻抗元件作为一个主要的交流元件,它是相间距离保护装置的测量元件,它的性能好,指标高低,直接影响到整机的性能。综合国内外各种保护的原理,同时结合我国实际情况,选用比较成熟的带记忆的圆特性方向阻抗继电器,分别作为一、二、三段阻抗元件,为了解决动作速度与超越的矛盾,阻抗元件采用了正、负半波与门比相和平均幅值比较两种比相方式,为了解决现有电网中日益增多的各种谐波对保护装置带来的不良影响,阻抗元件中,除了采用性能比较理想的滤波器外,主要从比相方式上加以克服,使之具有自适应功能,有效地抑制了谐波的影响。

图9是方向阻抗继电器的原理示意框图(以AB相为例)

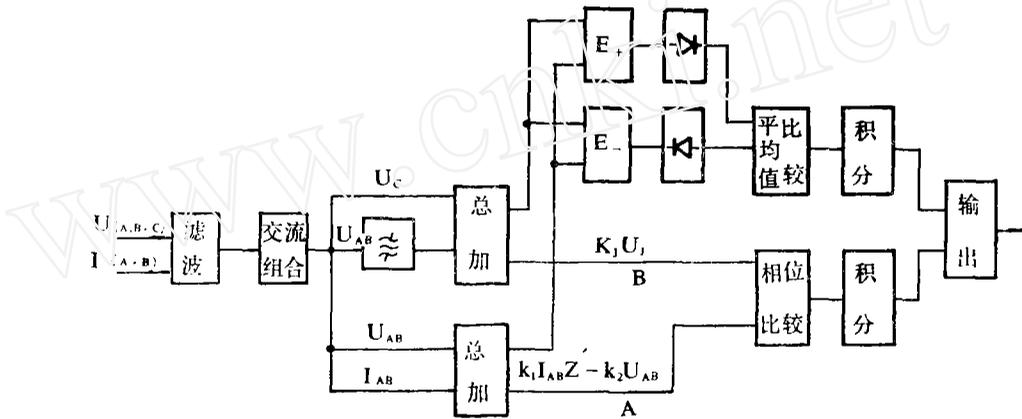


图9 方向阻抗简化原理框图

从图中可以看出,有两种比较电路,一种是平均值比较,一种为相位比较。

对于相位比较部分,当交流量A、B满足一定条件时,比相回路才有输出。即如果 $\text{Arg} \frac{A}{B}$ 满足下列条件, $-90^\circ < \text{Arg} \frac{A}{B} < 90^\circ$ ,其B是极化电压量,作为参考向量用,A是补偿电压量,当故障发生在整定范围之内,则A、B两信号的相位差落入 $\pm 90^\circ$ 之间,阻抗元件动作,故障发生在反方向或在区外,则A、B两信号相位差落入 $\pm 90^\circ$ 之外,阻抗元件不动作。

方向阻抗继电器的动作条件为,

$$-90^\circ < \text{Arg} \frac{A}{B} < 90^\circ$$

$$\text{亦即 } -90^\circ < \text{Arg} \frac{K_1 I_{AB} Z - K_2 U_{AB}}{K_7 U_7} < 90^\circ \quad (9)$$

双半波与门比相的原理框图见图10所示。

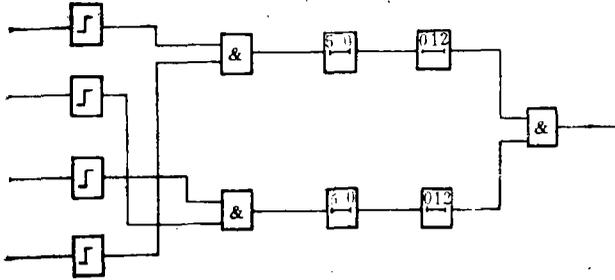


图10

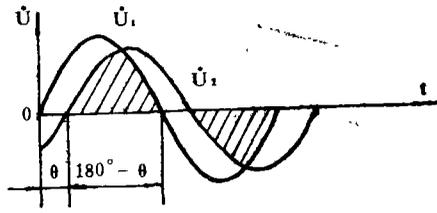


图11

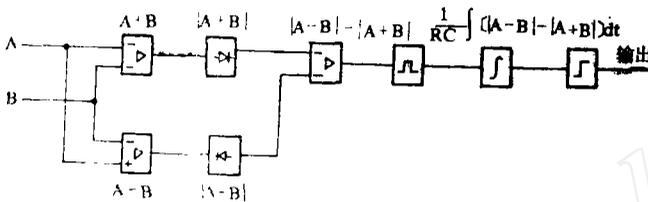


图12

这种接线采用了测量  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$  两个电压正、负半周瞬时值同时为正或同时为负的时间来构成，当两个电压的相位差角为  $\theta$  时，如图11中的阴影部分，就是它们同时为正或负的时间 ( $180^\circ - \theta$ )。

因此比较  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$  的相位差就可转化为测量  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_2$  瞬时值同时为正或为负的时间来代替，当同时为正或为负的持续时间达到  $\geq 5 \text{ ms}$  ( $90^\circ$ ) 时，比相回路就动作。

对于平均值比较部分，其原理框图见图12所示。

设 A、B 是两个被比较量，其动作判据是  $90^\circ \leq \text{Arg} \frac{A}{B} \leq 270^\circ$

$$\text{亦即 } |A - B| \geq |A + B|$$

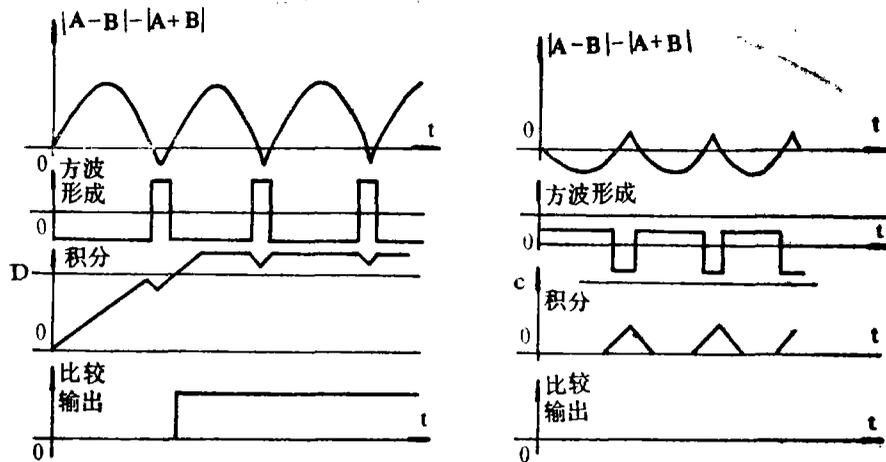
如果仅以此来作为判断阻抗动作的条件，从提高动作速度来说不失为一种较好的方法，但由于这种幅值比较容易受谐波分量及集成电路本身不平衡输出的影响，为此对于这种幅值比较再取平均值，以获得较好的测量精度，即动作条件变为：

$$\frac{1}{RC} \int [ |A - B| - |A + B| ] dt \geq D \text{ (常数)} \quad (10)$$

式中 D 为设置的门坎电压。

R、C 为常量电阻、电容，它们的作用仅改变动作时间，而对方向阻抗的动作特性毫无影响。其区内外故障输出波形见图13(a)、(b)所示。

从图13可以看出，只要恰当选择 R、C 及 D 的参数，平均值比较回路在区内故障时，其动作速度可以保证在一个周波之内。



(a) 区内故障                      图13                      (b) 区外故障

由于采用上述两种不同的比较电路，使阻抗元件的动作速度与超越的矛盾得到解决，试验结果表明，阻抗元件动作速度为10~16ms而暂态超越<5%。

### 高频保护

#### 1. 高频闭锁保护

由ZJL-45相间距离，ZJL-46接地距离，ZLF-45零序电流方向保护与SF-500集成电路收发信机配合，并设置相应的接口回路，可构成高频闭锁距离和高频闭锁零序保护。

SF-500型收发信机是依据“四统一”产品的技术要求，集国内同类产品的优点，并在吸取了引进的西门子公司ESB-500型电力线载波机先进技术的基础上，设计研制而成的，是SF-5B和SF-21<sub>x</sub>收发信机的更新换代产品，该装置的主要技术指标与老产品相比有较大程度的提高，见表2所示。

表 2

指 标	装 置	SF-21 <sub>x</sub>	SF-500
项目			
谐波电平		0	-26dB
防卫度	±2KC	29dB	38dB
	±4KC	33dB	48dB
	±14KC	53dB	63dB

由于采用了锁相环技术以及西门子公司载波机中先进的滤波电路，因此装置在全工作频段范围内用户可在现场作简单的调整（只需更换几个备用小插件）而不必用仪器调整，即能很方便的改变工作频率，则更是国内同类产品所不具有的。

## 2. 相差高频保护

“四统一”高频相差保护中,由于采用二次比相,提高了可靠性,但使整套保护的动作时间增长。为此在本设计中除了满足“四统一”设计原则单频制半周比相外,还补充了双频制正、负半周比相的有关部分,以期缩短保护的整组动作时间。

为了更好的配合双频率收发信机使用,采用了调整使用方便的方波移相回路,一般方波移相回路采用延时动作,延时返回两个相等的时间将方波向后移,但两个时间分别调整很难满足要求,现将两个时间统一为一个时间,即一个时间当两个时间用,这就不存在上述问题了,而且性能更好。

按“四统一”接线要求,采用两次比相回路,连续两次比相都成功后才允许接通跳闸回路。

### 综合重合闸

本次设计除满足原“四统一”原则外,还具有以下特点:

1. 依据新的“四统一”一个半开关接线的原则,即保护有选相功能,重合闸按断路器配置,将综合重合闸分成选相装置和重合闸两部份,使其可适用于一个半开关接线。
2. 本装置具有两种不同的选相方式,即阻抗选相方式和突变量选相方式,不需改变接线,仅更换几个模块即可完成上述两种选相方式的变换。
3. 同时,还可将选相装置与各种无选相能力的保护配合,使保护具有分相跳闸的能力。

上述各套新研制的集成电路保护装置及综合重合闸在500kV, 350kM模型系统和220kV, 156kM, 48kM, 8kM模型系统上经历了约7000次区内外故障,系统操作、系统振荡等不同工况的严格考核,试验结果表明,各装置的工作及相互配合性能完全符合设计要求,保护装置具有动作时间快(接地距离保护I段为12~25ms,相间距离保护I段动作时间为12~16ms)。方向性好,抗干扰性好,接地距离保护接地电阻能力强可达150~200Ω等特点。

## 四 结束语

本文概要说明了许昌继电器研究所和华中理工大学吸收引进保护的优点,在两部“四统一”设计基础上联合研制的500kV集成电路线路保护装置的设计原理及有关保护的配置,并着重介绍了接地距离保护,与其它国内500kV线路保护装置相比,不仅原理上还是设计原则上都有自己独有的特色,给电力系统用户提供了又一种新型的可供选择的110~500kV成套集成电路保护装置,目前已有少量产品送往山东、河北等地试运行。预计不久的将来即可开始批量供货。

### 参考文献

- [1] 王梅义、蒙定中、郑奎璋、谢葆炎、王大从编。《高压电网继电保护运行技术》
- [2] 朱声石编。《高压电网继电保护原理与技术》
- [3] 陈德树编。《以 $I_0$ 为极化的接地阻抗继电器特性分析》