

# 电气化铁道 $\Delta I$ 型高阻故障保护 距离继电器方案研究

铁道部电化设计院 杨建国

**摘要** 电气化铁道馈线高阻故障保护,是我国继电保护的空白。馈线高阻故障,一直困扰着设计和运营。攻克高阻故障的保护方法,是许多继电保护工作者苦苦探索的热点和难点。

笔者提出高阻故障增量型距离保护继电器方案,既能满足常规距离保护的要求,又能保护馈线的高阻接地故障及 AT 区段正馈线断线故障,可用作各种供电制式的馈线保护。其性能优于国外同类继电器。

**关键词** 高阻故障保护 增量型距离继电器

## 1 距离继电器高阻保护性能的提出

大秦西段电气化铁路通车时,曾发生两起正馈线断线故障。一次烧断了全部通信、信号、及电力电缆,另一次烧坏了 N 线及自耦变压器,对铁路运输造成了重大影响,由此引起了人们对馈线高阻故障的关注。

所谓高阻故障,其一为 AT 供电区段,正馈线断线故障。正馈线断线的悬空侧的继电器的测量阻抗,将数倍乃至数十倍地增加,线路的阻抗角大致为  $60^\circ \sim 70^\circ$ 。图 1 为

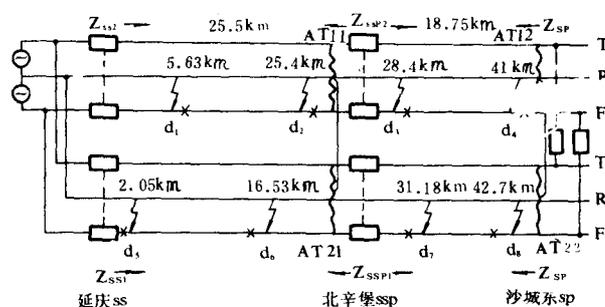


图 1 延庆—北辛堡—沙城东供电臂正馈线断线故障示意图

表 1 延庆—沙城东供电臂正馈线断线故障保护测量阻抗的计算值:

故障点	故障点距 ss 的距离(km)	阻抗的计算值( $\Omega$ )					计算式
		$Z_{ss2}$	$Z_{ss1}$	$Z_{ssp2}$	$Z_{ssp1}$	$Z_{sp}$	
$d_1$	5.63	$13.6 \angle 66.1$	$5232. \angle 56$	$538.4 \angle 59.5$	$539.4 \angle 59.5$	$534.4 \angle 58.5$	$Z_{ss} = \frac{V_r - V_f}{I} (1 + jP)$
$d_2$	25.4	$22.3 \angle 70.3$	$111.9 \angle 70.7$		$93.4 \angle 70.4$	$80.8 \angle 71.5$	
$d_3$	28.4	$30.9 \angle 68.8$	$172.4 \angle 69.3$	$18.4 \angle 70.2$	$154 \angle 68.8$	$143.4 \angle 69.2$	
$d_4$	41.0	$58.5 \angle 67.6$	$520.6 \angle 70.1$	$45.8 \angle 67.7$	$513.2 \angle 69.2$	$524.2 \angle 69$	
$d_5$	2.05	$135.6 \angle 63.2$	$234.5 \angle 75.7$	$115.6 \angle 62.6$	$97.4 \angle 62.8$	$104 \angle 62.5$	
$d_6$	16.53	$94.1 \angle 64.6$	$111.1 \angle 73$	$75 \angle 63.4$	$57.2 \angle 63.7$	$62.5 \angle 63$	
$d_7$	31.18	$71.3 \angle 66.9$	$166.9 \angle 69.8$	$56.2 \angle 66.1$	$148.2 \angle 69.2$	$43 \angle 66.6$	
$d_8$	42.7	$34.6 \angle 68.7$	$65 \angle 70.8$	$18.6 \angle 68.1$	$45 \angle 70.2$	$6.8 \angle 75.7$	

发生上述一起故障的延庆—沙城东供电臂示意图,图中列举了一些典型点正馈线断线故障,表 1 为相应阻抗计算值。表中数据为断线后一端金属性短路的情况。延庆变电所,北辛堡开闭所、沙城东分区亭内现行的进线及馈线保护对有些点的故障,将无法保护。实际运行中大

本文 1992 年 12 月收稿

收稿量出现的是，正馈线段在路基上这种非金属性短路的情况，该情况下，短路点过渡电阻加大，阻抗角变小，继电器动作将更加困难。其二为，经故障点高过渡电阻接地，过渡电阻分散性很大。由于列车的牵引定数及行车密度越来越大，现行的馈线保护继电器保护过渡电阻的能力越来越差，见图2。表中部分点故障时将不能动作。因此研制新型保护继电器已是刻不容缓了。

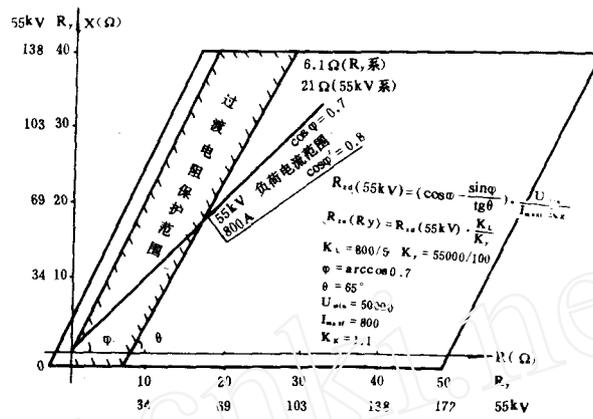


图2 大秦段变电所馈线四边形距离继电器电阻保护范围

日本高阻故障保护的研究走在各国的前列。其作法：一是不断地完善整个馈线保护系统的高阻保护性能，如图3中山阳等线采用的保护方式；二是不断研制高阻保护性能更好的继电器，如图3中继电器由偏移阻抗型变为四边形阻抗型，变为L型阻抗继电器，最后研制出具有较好高阻保护性能的继电器—— $\Delta I$ 继电器。详见图3。

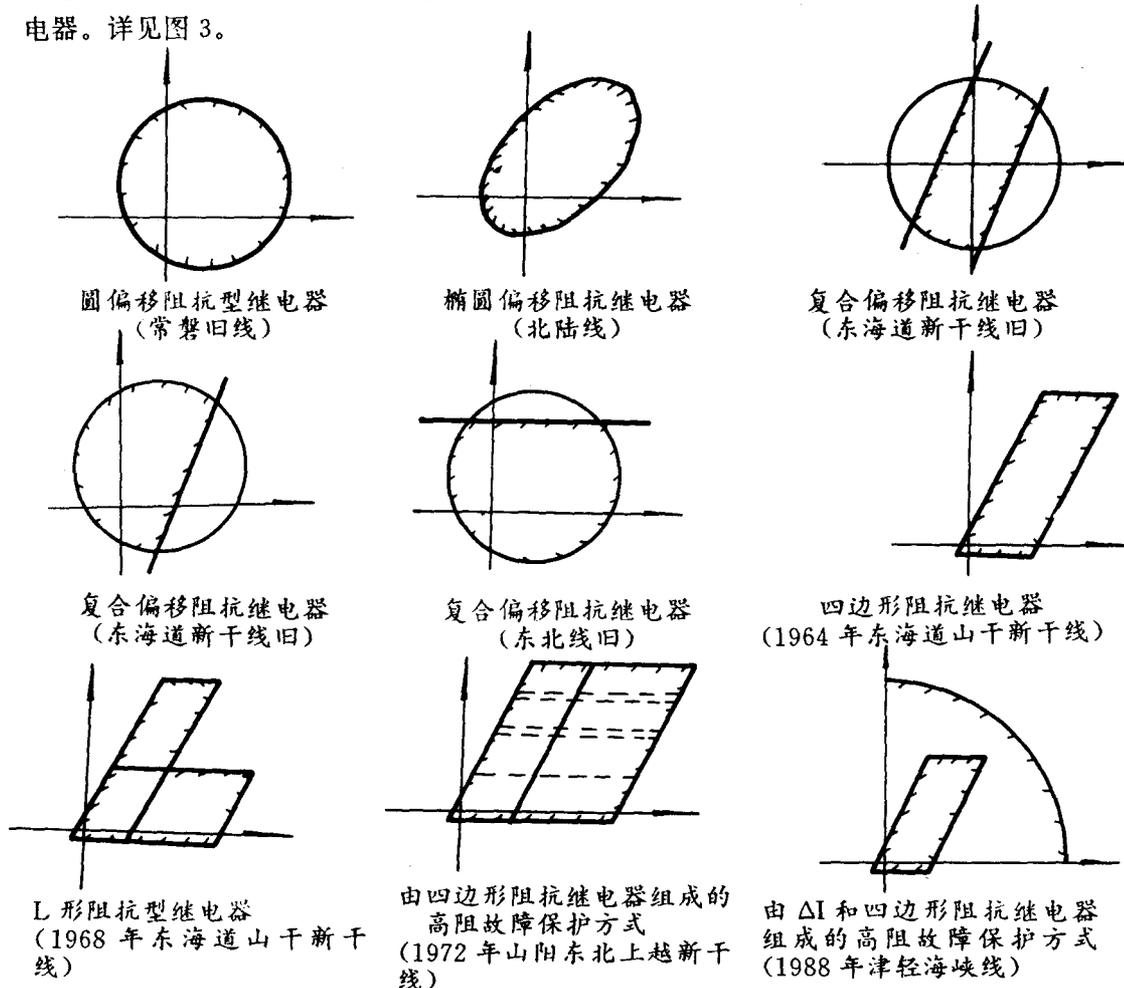
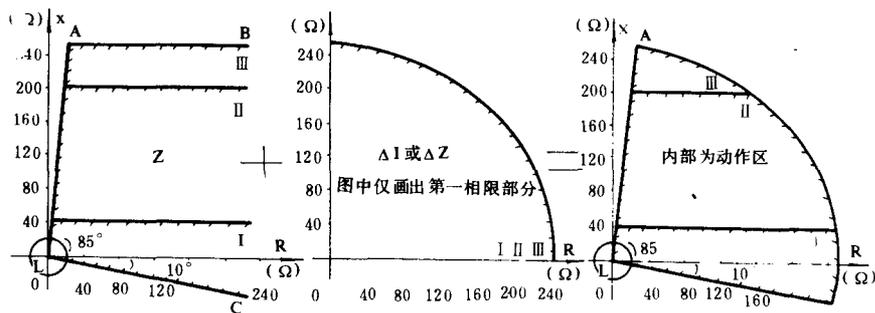


图3 日本交流电气铁道馈线保护方式及继电器的演变



(a) 开口四边形阻抗特性 (b)  $\Delta I$ 、 $\Delta Z$  圆形增量特性 (c) 增量型阻抗元件动作特性

图 4  $\Delta I$  型高阻故障保护距离继电器动作特性组成图

## 2 高阻故障保护距离继电器的原理

### 2.1 高阻故障保护距离继电器的保护功能

- (1) 本继电器具有现行四边形馈线距离继电器的保护性能。
- (2) 对高过渡电阻接地故障及 AT 正馈线断线故障，有很高的保护能力。
- (3) 可用于直供、AT、BT 等多种供电制式。

### 2.2 继电器的相位特性

继电器由开口向右的开口四边形与一个圆心在 0 点的圆围成的。详见图 4。

### 2.3 高阻故障保护距离继电器的原理。

本继电器有两个保护元件—— $\Delta I$  型阻抗元件与过流元件组成。

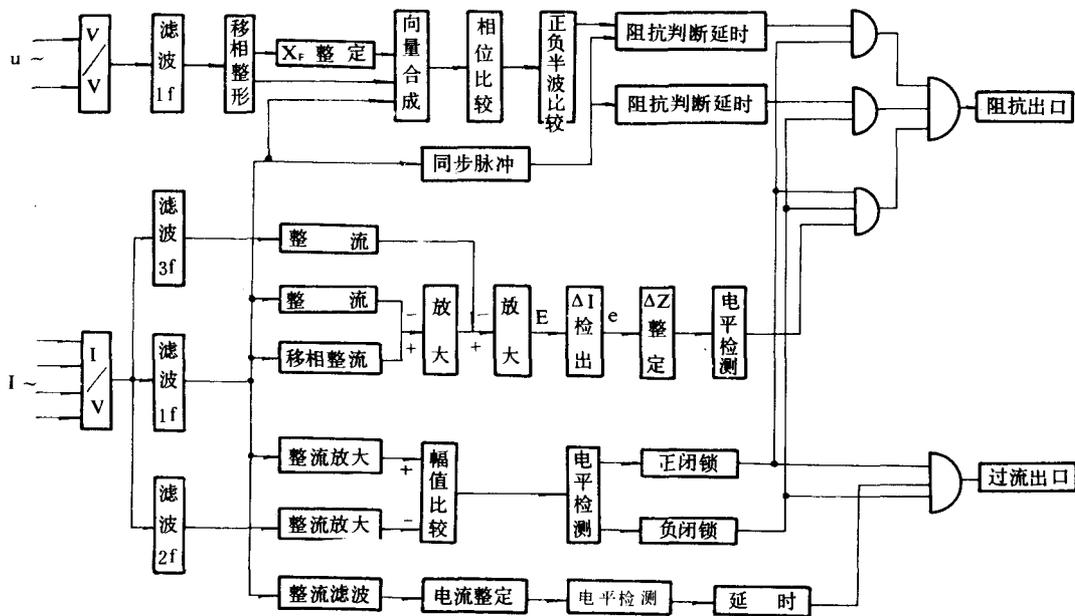


图 5  $\Delta I$  型高阻故障保护距离继电器原理方框图

$\Delta I$  型阻抗元件：由三次谐波制动的  $\Delta I$  起动回路，与由比相原理构成的开口四边阻抗测量回路组合而成。为防止涌流引起继电器误动，又增加了二次谐波闭锁回路。

电流增量回路，是为了把继电器按躲开最大负荷电流整定，变为按躲开最大负荷电流增

量整定,使保护过渡电阻的能力有较大提高(可提高7倍左右)。参看后边有关论述。

三次谐波制动回路,可进一步提高高阻保护功能,根据所用机车高次谐波含有率不同,功能提高程度不同,约二倍左右。下面结合图5加以说明。

从电流互感器来的电流,经基波滤波、整流,整流与移相整流的并联回路并放大后,再与经三次谐波滤波及整流后的值进行差动放大。设该点的输出电压为E。

$$\text{则: } E = K_{A1}I_1 - K_{A3}I_3 \quad (1)$$

式中  $I_1$ ——馈线电流中的基波分量。

$I_3$ ——馈线电流中的三次谐波分量。

$K_{A1}$ ——基波电流的回路变换系数。

$K_{A3}$ ——三次谐波电流的回路变换系数。

然后输入到  $\Delta I$  检出回路,设检出回路的输出电压为e。当继电器的输入电流由I( $I_1$ 、 $I_3$ )变为I'( $I'_1$ 、 $I'_3$ )时。

$$e = K_A [(K_{A1}I'_1 - K_{A3}I'_3) - (K_{A1}I_1 - K_{A3}I_3)] = K_A (K_{A1}\Delta I_1 - K_{A3}\Delta I_3) \quad (2)$$

式中  $K_A$ —— $\Delta I$  检出回路的变换系数

设:第三次谐波对于基波的含有率为 $\alpha$ ,即  $\frac{\Delta I_3}{\Delta I_1} = \alpha$

当  $K_{A3} = 3.33K_{A1}$  时,

则:式(2)变为

$$e = K_A K_{A1} (1 - 3.33\alpha) \Delta I_1 \quad (3)$$

$$\Delta I_1 = \frac{e}{K_A K_{A1} (1 - 3.33\alpha)} \quad (4)$$

令:  $\frac{e}{K_A \cdot K_{A1}} = \Delta I_{1zd}$

则当:  $\Delta I_1 > \frac{\Delta I_{1zd}}{1 - 3.33\alpha}$  时,  $\Delta I$  起动元件动作。

该特性示于图6中。可见,在同一整定值时,继电器在 $\alpha=0$ 时动作最灵敏, $\alpha$ 增大灵敏度降低。即是说,馈线故障时,保护动作的灵敏度最高。正常运行时保护的灵敏度降低,保护躲负荷能力增强,这样高阻保护性能提高了。

过流元件:为确保馈线近端出口短路时,继电器快速可靠动作而设。为防止涌流引起误动,提高动作灵敏度,过流元件也具有二次谐波闭锁功能。

## 2.4 高阻故障保护继电器的判据

### 2.4.1 以电流增量的大小为判据

(1) 馈线最大负荷电流。馈线最大负荷电流一般按一个供电臂上有数台机车运行,其中一台机车起动考虑。该电流要数倍于一台机车的额定电流。(2) 最大负荷电流增量。负荷电

流增量,发生在机车起动、调速及惰行过电分相时。最大负荷电流增量,应考虑一台机车上上述情况的最大值,因可能同时存在其它机车较小的负荷增量,故在上述值上加一个不大于2的

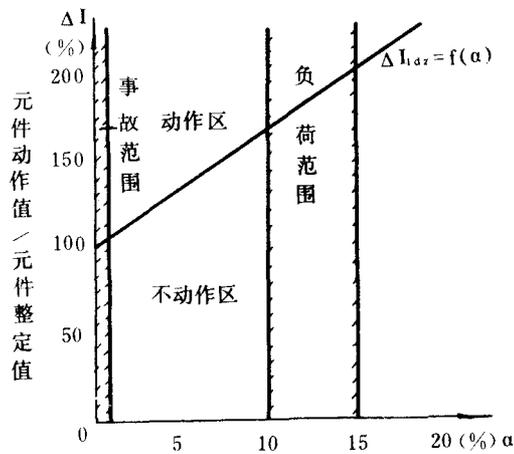
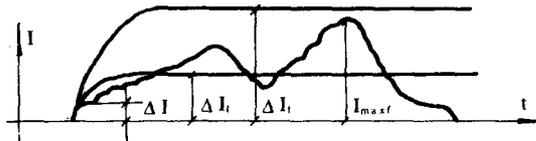


图6  $\Delta I$ 型阻抗元件动作值和 $\alpha$ 的关系

可靠系数。

(3) 事故电流。事故电流也是一个增量电流，其值一般很大。但在高过渡电阻接地或 AT 正馈线断线时，事故电流也可能很小。

上述三种电流的关系是：事故电流一般大于馈线最大负荷电流，馈线最大负荷电流远大于最大负荷电流增量，高阻故障时的事故电流一般也比最大负荷电流增量大，见图 7。



$I_{max}$ : 馈线的最大负荷电流  $\Delta I_1$ : 事故电流增量  
 $\Delta I$ : 馈线最大负荷电流增量

图 7 馈线最大负荷电流、最大负荷电流增量、事故电流增量比较

若按照图中躲开最大负荷电流 ( $I_{max}$ ) 变为按照躲开最大负荷电流增量 ( $\Delta I$ ) 整定继电器，则保护能力有很大提高。

#### 2.4.2 以馈线电流和谐波成份为判据。

##### (1) 正常运行状态

目前我国运行的机车，三次谐波对于基波的含有率大体为：

SS <sub>1</sub> 型	18~27%	SS <sub>3</sub> 型	18~28%	SS <sub>4</sub> 型	18~35%
6K 型	6~27%	8K 型	2~22%	6Y <sub>1</sub> 型	21~27%
6Y <sub>2</sub> 型	20.5~21%				

##### (2) 励磁涌流

空载投入机车变压器，空载投入含有 AT 的接触网，机车惰行过电分相时，都会产生励磁涌流。我院在京秦线对机车过电分相及空投接触网的涌流进行了数十次测试，测试回路及波形见图 8。经分析馈线的合闸涌流：

(A) 其大小、方向、波形随被测回路的构成及合闸角不同而不同，其峰值有时大于馈线最大负荷电流峰值；其持续时间较长，至 10 周波时，有效值仍可达第一周波的 30% 以上。

(B) 涌流中含有大量直流及二、三次谐波分量。二次谐波含有率在 40% 以上，见表 2。

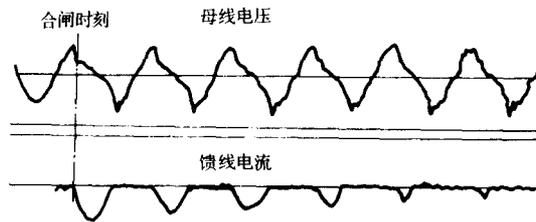
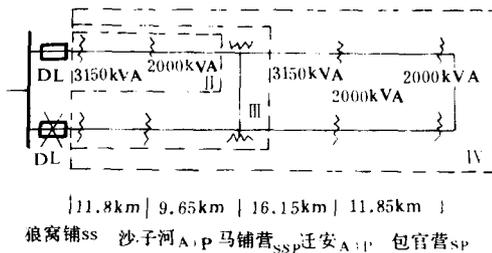
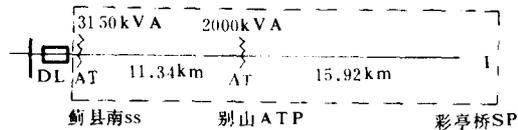


图 8(a) 测试涌流的供电回路及第三种情况的涌流波形

表 2 AT 区段接触网馈线涌流中二、三次谐波对于基波电流含有率的实测值

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
二次	43~54%	54~65%	60~85%	71~93%	74~99%	82~97%	92~104	84~102%	82~102%	85~98%
三次	1~11%	12~28%	19~36%	35~68%	38~74%	43~70%	48~81%	47~76%	49~77%	53~74%

##### (3) 事故电流

事故电流基本是正弦波。

据以上情况,涌流可能引起继电器误动,用二次谐波闭锁防止误动;三次谐波可作为区别正常运行及事故状态的判据,但考虑到高阻故障时,机车仍可能运行,故三次谐波仅作为制动量,而不作为闭锁条件。

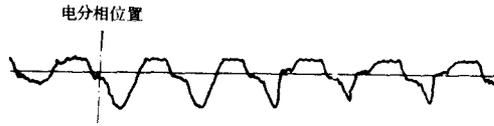


图 8(b) 机车通行电分相时的馈线电流实测波形(机车过电分相时供电臂上还有其它负荷电流)

### 3 高阻故障保护距离继电器的主要技术条件

本继电器由  $\Delta I$  型阻抗元件(根据需要可设 I、II、III 段)过流元件、二次谐波闭锁元件构成。其主要技术条件为:

- (1) 交流电压、电流: 100V、5A、50Hz
- (2) 直流电源电压: 110V 或 220V
- (3) 电抗整定范围 ( $90^\circ$ ):  
I 段: 1~50 $\Omega$  II 段: 4~200 $\Omega$  III 段: 5~250 $\Omega$

$\Delta I$  整定范围 0.4~4A

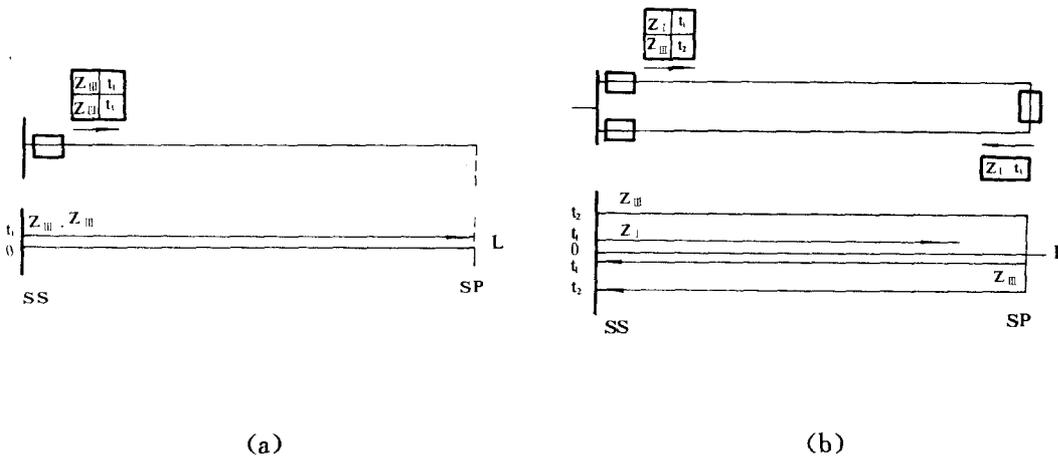
动作时间整定范围 I 段: 0.05~0.5s II 段: 0.1~1s III 段: 0.2~2s

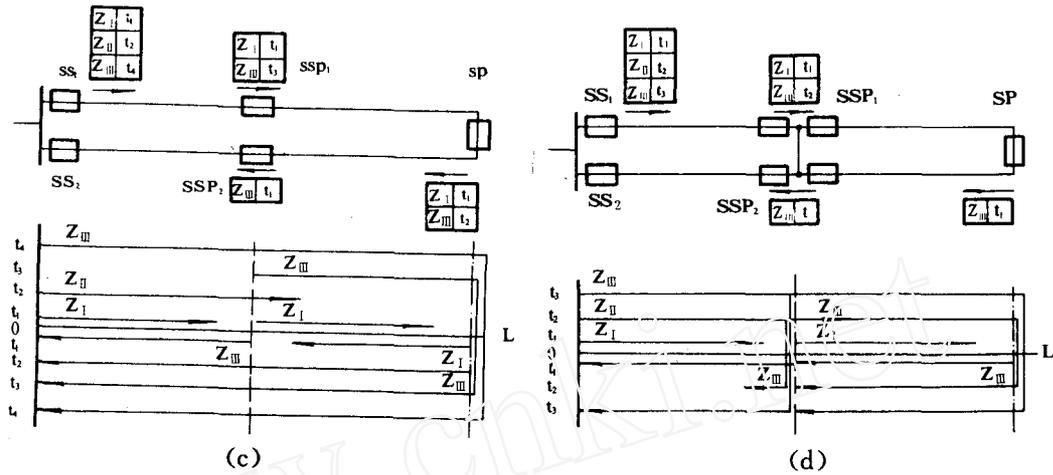
精工电流: 0.4~2s

- (4) 过电流整定范围: 5~30A  
动作时间整定范围: 0.05~0.5s
- (5) 二次谐波闭锁值:  $I_2/I_1 \geq 15\%$

### 4 高阻保护系统的配置及继电器整定

为适应不同电铁馈电系统的特点和运行方式,高阻馈电保护系统及各保护的配合方式有四种基本类型,见图 9。





图中

$Z_I$ 、 $Z_{II}$ 、 $Z_{III}$ ——为高阻继电器的 I、II、III 段。  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ——保护的整定时限。

$t_1=0.1s$ 、 $t_2=0.1+\Delta t$ 、 $t_3=0.1+2\Delta t$ 、 $t_4=0.1+3\Delta t$   $\Delta t$ ——保护配合的时间阶梯

图 9  $\Delta I$  型高阻故障保护距离继电器保护系统及配合方式

#### 4.1 $\Delta I$ 边的整定:

$\Delta I$  边按躲过最大负荷电流增量整定。整定

可按下式:

$$\Delta I_{\text{ad}} = K_K \cdot \Delta I_{\text{max}} / k_1 \quad (5)$$

式中  $K_K$ ——可靠系数, 可取 1.2~2.0。

$k_1$ ——电流互感器变化。

$\Delta I_{\text{max}}$ ——最大负荷电流增量。

$\Delta I_{\text{ad}}$ ——起动回路(增量边)整定值。

#### 4.2 电抗边整定:

电抗边除象现行保护一样, 考虑系统中上、下级及主、后备保护间的配合关系, 保证选择性外, 还需考虑正馈线断线时电抗值很大的特点。按下述原则整定。

(1) 各所、亭最末一段之外的各段保护, 和现行保护一样, 仍按选择性的要求, 进行动作值和动作时间的整定。

(2) 各所、亭的最末一段保护, 改为按躲过最大负荷电流增量整定。仍按选择性要求整定动作时间。

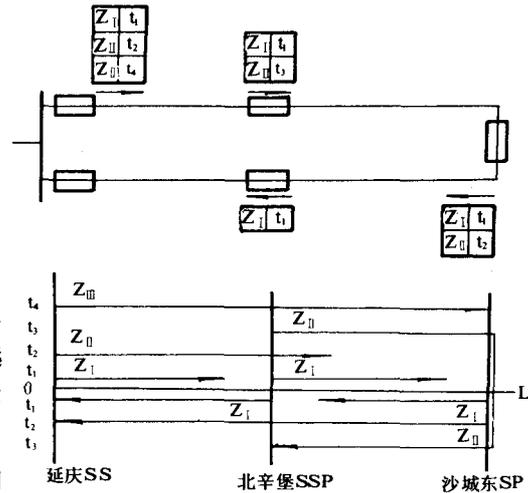


图 10 四边距距离继电器保护系统及配合方式

## 5 增量型高阻故障保护距离继电器的优越性能。

### 5.1 与国内既有馈线保护继电器相比

国内既有有线采用的四边型阻抗继电器, 过渡电阻的保护性能最好。现以采用该种继电器的大秦西段, 延庆——北辛堡——沙城东供电臂为例与高阻保护距离继电器进行比较。其保护系统的配置及配合方式, 示于图 10 中, 对应的高阻故障保护距离继电器保护系统及配合方

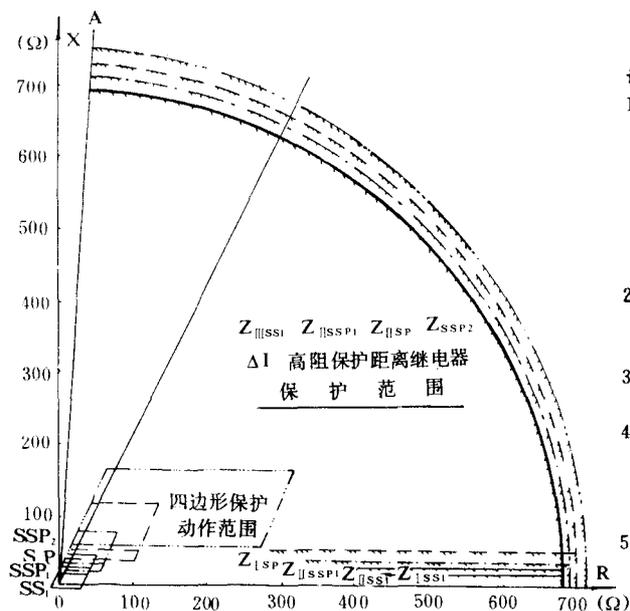
式示于图 9 中。两种方式的性能比较示于图 11 及表 3 中。参数均已归算至 55kV。四边形保护的定值是该臂的实际定值。高阻故障保护继电器的值,是根据韶山 1 机车的运行特性,按躲开最大负荷电流增量计算的整定值。电抗边按选择性及正馈线断线时的保护需要计算的整定值。

表 3 增量型高阻故障保护距离继电器与四边形继电器保护范围比较表

保护安装处	变电所			开闭所		分区亭	
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	J	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub> K <sub>2</sub>
四边形保护 整定值 x/R(Ω)	19/31	24/31	49/31	110/250	36/50	76/50	54/58 116/88
增量形保护整 定值 x/R(Ω)	19/694	24/694	694/694	745/717	36/703	714/703	51/726 726/726
增量形保护能 力扩大到倍数	1/22.4	1/22.4	14/22.4	6/2.9	1/14	94/14	1/8 6/8
变电所、亭点 的阻抗值 x/R(Ω)	ssp <sub>1</sub> 为 20/9 sp 为 32/15 ssp <sub>2</sub> 为 51/23 ss <sub>2</sub> 为 7203/49						

注: 1 该表数据皆归算至同一坐标系。表中阻抗为 55kV 等级。

2 表中 J 表示进线, K 表示馈线。下标表示保护段数。



说明:

- 1 —— 变电所保护继电器保护范围。  
- · - 开闭所馈线保护继电器保护范围。  
- - - 分区亭馈线保护继电器保护范围。  
- · · 开闭所进线保护继电器保护范围。
- 2 为使图面清晰,图中未画出继电器固定边 x<sub>B</sub> 边。未画出箭头至 OA 线部分。
- 3 四边形继电器的保护范围,系该供电臂的实际整定值。
- 4 ΔI 型高阻故障保护距离继电器的保护范围,系按选择性和考虑 AT 正馈线断线保护的需整定的。其中 ΔI<sub>max</sub> = 120A (275kV) K<sub>K</sub> = 1.2
- 5 保护系统及配合关系见图 9c。

图 11 延庆——北辛堡——沙城东供电臂用 ΔI 型高阻故障保护距离继电器与四边形继电器性能比较  
经比较可得出如下结论:

(1) 高阻故障保护距离继电器比四边形距离继电器保护过渡电阻的能力大得多。开闭所进线保护扩大到 3 倍,变电所、开闭所、分区亭的所有保护,扩大到 8~22 倍。

(2) 对于表 1 所列的延庆——沙城东供电臂正馈线断线故障,现行的四边形距离继电器有不少点不能动作。而高阻故障保护距离继电器在所有点均能可靠动作,而且每一点都有主保护及近、远后备保护,可以说是很完善的高阻保护系统。

5.2 与国外最好的高阻保护继电器—— $\Delta I$ 继电器相比。

$\Delta I$ 继电器——“ $\Delta I$ 型故障选择继电器”，是专门为保护馈线高阻故障而开发的后备保护继电器，80年代末开始在日本电铁中广泛采用。现仍以延庆——沙城东供电臂为例，与 $\Delta I$ 配合用的主保护为四边形距离继电器。其保护系统配合及保护性能见图12。

其结论如下：

(1)  $\Delta I$ 继电器，只能作后备保护，需要四边形继电器作主保护，构成保护系统。故仅后备保护有高阻保护功能，高阻保护的可靠性差，不具备动作的可靠性。

(2) 高阻故障保护继电器可做主保护，也可作后备保护，其构成的保护系统，主、后备保护均有高阻保护功能，是完善的高阻保护系统，故可实现高阻保护的可靠性和速动性。

通过上述比较，可看出：本高阻故障保护继电器，性能远优于四边形距离继电器，也优于国外高阻保护性能最好的继电器。且本方案构成的继电器与四边形继电器比并不复杂，性能价格比大，又是以 $\Delta I$ 及四边形继电器的成熟经验为基础的，是切实可行的。据调整，国内电气化铁道高过渡电阻故障及AT正馈线断线故障较多，高阻故障保护继电器在国内尚属空白。因此，加速研制本继电器是当务之急。

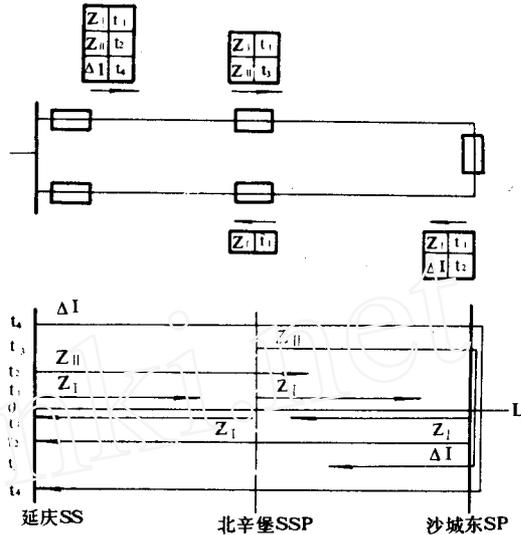


图12(a)  $\Delta I$ 与四边形距离继电器保护系统及配合方式

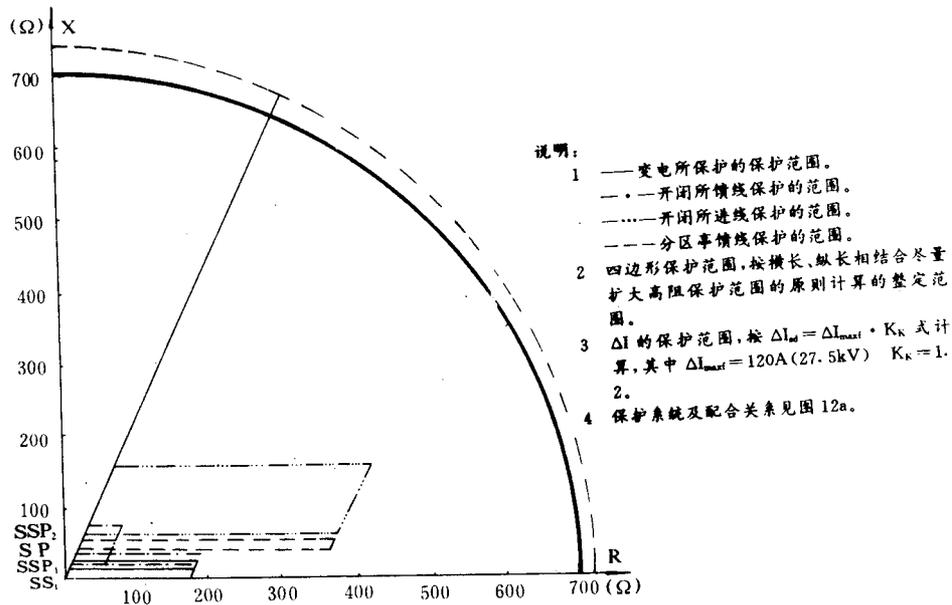


图12(b) 延庆——北辛堡——沙城东供电臂采用 $\Delta I$ 与四边形继电器组成保护系统的保护性能

# 变电站综合自动化系统构成的讨论\*

郑州工学院 罗文广

**摘要** 本文从综合的涵义和意义出发,讨论了变电站综合自动化系统(以下称系统)的构成原则,分析了我国变电站自动化系统的现状,给出了一种切实可行的方案。

**关键词** 综合 共享 数据通道 可靠性

## 1 前言

在我国,微机继电保护、微机录波测距、微机监控、微机远动等自动化装置,均已达到了实用化程度。但它们在功能上和硬件上以及变电站二次接线上都有很大程度的重复,如何将这些以微机为核心的自动化装置用计算机网络联系起来,使之共享信息资源,节省重复的硬件开支,简化变电站二次回路设计,并节省信号电缆,缩小主控室面积,达到较高的技术性、可靠性、经济性和实用性,这便是摆在我们面前的一大课题。为此,就要建立一种综合自动化系统——集保护、计量、监控、远动等为一体的共享系统。今后要进一步提高自动化

## 6 $\Delta I_{\max}$ 取值的研究。

$\Delta I_{\max}$ 的取值,关系到继电器动作的可靠性及高阻保护性能的充分发挥,故专门加以研究。

日本在整定 $\Delta I$ 继电器时, $I_{\max}$ 取值为一系列最大编组的列车的最大电流。其原因,日本采用机车自动过分相——牵引工况过分相。我国目前采用惰行过分相,故可不必按最大编成的列车的最大电流考虑。而按机车惰行过分相,机车起动,加速调整三种情况的最大电流增量取值即可。

### (1) 机车起动时的电流增量

机车起动时电流增量与机车的额定电流,调速方式,机车的操作过程等因素有关。以韶山1机车为例。起动过程分级进行,每一级电流增量不过20A(27.5kV)。

### (2) 机车调速时电流增量。

机车调速5~17级间可根据车速,快速进给适当机位,电流增量绝不会超过120A(27.5kV)。

### (3) 机车过分相时的电流增量。

机车过分相前手柄回零,断主断路器,过分相后,合主断,手柄快速进给。其电流增量最大值远小于120A(27.5kV)为防止误动,按10A考虑。

综上所述,ss<sub>1</sub>机车最大电流增量不会达到120A(27.5kV)。

因一个供电臂上有数台机车,在一台机车过分相时,可能有其它机车起动或调速,故应取1.2~2的可靠系数。开始时可适当选得高些,以后根据情况下调。

无级调速机车有所不同,但在额定电压电流范围内平稳调速,防止机车空转的基本要求是一致的。由此可预选一个最大电流增量,然后根据运行情况调整。

\* 本文1992年5月收稿