

具有避越电流回路断线的整流型 发电机差动保护的研究

水利电力部华南电网办公室 张子亮
许昌继电器研究所 沈学斌

一 概 述

对于大型发电机的纵联差动保护,要求快速切除发电机内部相间短路和发电机两点接地故障,这无论对于发电机本身的安全,还是对系统的安全稳定运行,都是非常重要的。以往国内采用的BCH型差动保护,其快速性和灵敏性都不能满足要求,因为它采用速饱和变流器来躲非周期分量,对外部故障取得了延缓作用保证了保护可靠不动,然而内部故障的暂态过程也有非周期分量则也使差动保护延缓动作,显然快速性较差,另外保护定值为了躲过外部故障不平衡电流,一般整定值均大于发电机额定电流,这对于发电机经过渡电阻短路,或在靠近发电机中性点相间故障以及 x_{Σ} 较大的发电机发生内部相间短路故障,因短路电流小而灵敏度较低,即使采用高灵敏接线,灵敏度依然较低。

近几年来,国内对于10万千瓦以上的发电机组采用了按比率制动原理构成的差动保护,从保护的动作速度和灵敏性来看均优于BCH型,其整定值可以为0.1倍额定电流,根据有关文献介绍,在离发电机中性点1%处经过渡电阻短路,还可以有足够的灵敏度,例如许继厂生产的LCD—8型发电机差动继电器就是采用这种原理实现的。虽然这种继电器从减少保护死区和快速性有明显的优点,但应该指出,这种继电器因其动作值小于额定电流,当交流电流回路断线时将要误动作,而导致运行单位及设计单位不敢采用,限制了这种产品的推广。

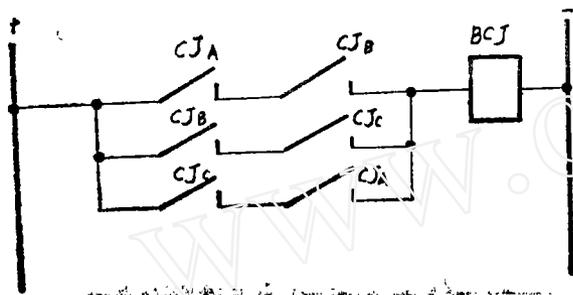
近几年来,河南省中调所和许昌继电器研究所,共同合作研制了利用电流综合制动原理实现的发电机纵联差动保护,该保护能保证交流电流回路断线时发电机差动不误动。而在内部相间及不同相区内及区外各有一点接地故障时,都具有足够的灵敏度,利用该原理实现的发电机差动继电器,82年完成性能试验,83年制造出样机,完成动模试验及型式试验,84年初投入姚孟发电厂30万千瓦发电机上试运行。经过一年多工业试运行及动模试验,保护动作正常,证明了利用综合电流制动原理实现的差动继电器性能良好,不仅具有灵敏快速的优点,而且交流电流回路断线不误动,较好地解决了电流回路断线误动的问题。本文试图在分析一些防止电流回路断线保护接线的基础上,就电流综合制动接线原理及试验情况进行论述。

二 防止电流回路断线的几种接线方案

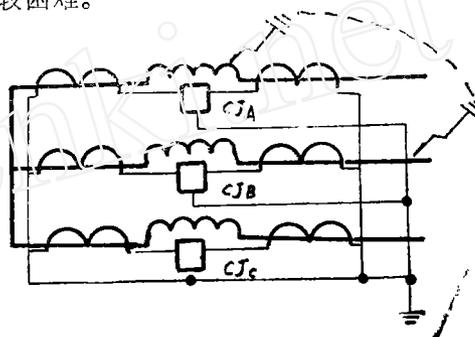
采用按比率制动原理制成的具有折线制动特性的差动继电器其特点是外部故障制动特性好，内部故障灵敏度高，只是电流回路断线时误动，为了防止断线误动可以采用适当的保护闭锁接线加以解决，下面将对几种接线作一简单介绍和分析。

(一)、两相差动继电器的触点相串联

接线如图一，断线一般不会两相电流回路同时出现断线，因此当一相断线时不会使差动保护出口继电器起动，保证了断线不误动。这种接线的优点是简单，缺点是不能反应差动范围内、外各一点（不同相）接地短路，如图二所示。另外要求差动继电器的执行元件要有两付常开触点，若采用极化继电器就较困难。



图一 两相触点串联接线



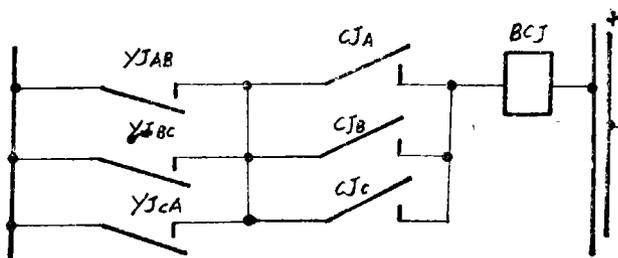
图二 发电机两点（两相）接地

(二)、采用低压闭锁的接线（图三）

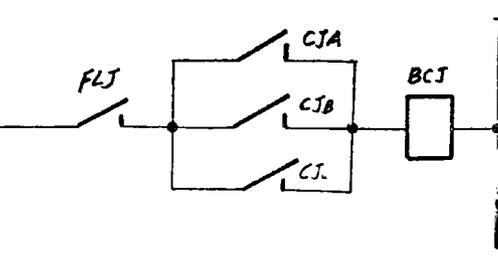
因为电流回路断线时电压不会降低，而故障时电压会降低，这样便可用低电压继电器的触点与差动继电器的常开触点串联起来，防止电流回路断线时差动继电器误动作。这种接线的优点是简单容易实现，缺点除增加三个低电压继电器外，由于电压继电器触点与差动触点串联，一旦电压继电器触点接触不良便会造成保护拒动。另外还需增加电压回路断线监视装置。

(三)、加灵敏负序电流元件闭锁

直接接线如图四。此方案是将灵敏的负序电流元件接到另一组电流互感器上，灵敏负序电流元件的触点与差动继电器触点相串联，当差动保护电流回路断线时，由于负序元件装于另一组电流互感器上而不动作，这样整套保护不误跳闸。



图三 低电压闭锁接线

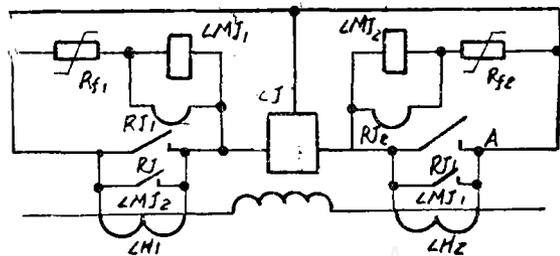


图四 灵敏负序电流元件闭锁接线

这种接线的优点是闭锁可靠，不会限制差动保护的灵敏性和速动性。缺点由于增加触点增加了拒动的可能性外，这种接线比较复杂、灵敏负序电流元件的技术特性要求较高。

(四)、交流灵敏元件闭锁接线(图五)

这种接线是在“日立”公司用非线性电阻保护电流互感器开路的方案基础上，增设了交流灵敏元件。图中 R_f 为非线性电阻， $LMJ_{1、2}$ 为交流灵敏元件，当电流互感器二次断线时，将出现高电压，但由于非线性电阻作用降低了开路电压，并使热继电器 RJ 动作，其触点将电流互感器二次短路而保护了互感器，与此同时与交流灵敏元件并联的热继电器 RJ 动作，其触点瞬时闭锁差动保护。这种闭锁方案作为保护互感器开路，同时又闭锁保护，是一种考虑比较全面的方案。但从闭锁保护这一点看，它还是比较复杂的，不仅需要增加灵敏元件，且需将它接于电流互感器上，这样使闭锁元件与差动保护一样都处在断线的威胁中(如图五A处断线)。



交流灵敏元件闭锁接线(交流电流部分)图
图五

综上所述四种接线都能防止断线误动，以第一方案较为简单，但不能反应差动范围内外(图二)各一点接地。其他三种都属于闭锁方式，断线时靠闭锁元件动作来闭锁差动保护，使它不动作，因此都得另加闭锁元件，使保护复杂是显而易见的。除此以外，闭锁元件如负序灵敏元件、交流灵敏元件其动作速度、灵敏性都得和差动保护配合，因此对这些元件技术性能要求较严格。总之，增加闭锁元件来解决断线误动不是一种理想的办法，要克服上述缺点，只有差动继电器本身具有避越断线能力才是比较理想的。

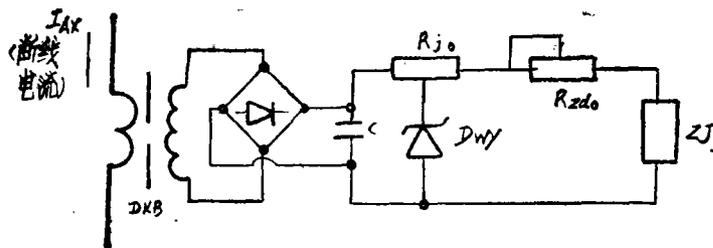
三、具有避越断线能力的LCD—8 A差动继电器的构成

(一) 新型差动继电器的要求:

- (1)、继电器应能保证可靠地切除发电机内部相间短路和保护两点接地。
- (2)、保证发电机正常运行时，发电机差动保护电流回路断线和发电机差动保护范围外部相间短路，继电器可靠不动作。
- (3)、不考虑发电机差动保护范围外部短路，同时又发生二次电流回路断线。

(二) 防止断线误动环节的设计

防止断线误动环节仍然是利用中性线上有无电流来判断是否断线，如果中性线上有电流，利用该电流来制动差动继电器。而当发电机差动保护范围内、外一点(不同相)接地时，为了保证在这种短路故障情况下保护能可靠跳闸，因此要求断线闭锁制动环节当中性线上电流超过1.15~1.2倍额定电流时，制动系数小于1，使保护动作于跳闸。为此，在原来LCD—8型发电机差动继电器基础之上，增加如下断线闭锁环节，其接线示于图六。



图六 防断环节原理接线

图中DKB为电抗变压器，一次线圈串接于中性线上，当电流回路断线时中性线有电流流过，DKB二次出现电压，整流后直流通通过 R_{j0} 、 R_{zd0} 加于差动保护执行元件，在执行元件上产生一制动电压，使差动保护不能动作。当发电机差动保护范围内，外各一点（不同相）接地时，中性线将流过故障电流，当故障电流达到1.1倍左右额定电流时稳压管 D_{wy} 开始击穿，制动作用截止，当电流大于1.15~1.2倍额定电流时，保护能可靠动作，这样便可达到断线时使保护可靠制动，两点接地时保护可靠动作。

(三) 断线制动特性的设计

根据一般比率制动原理制成的具有折线制动特性的差动继电器，要满足断线时不动作，保护区内、外两点接地时可靠动作的要求，其制动条件是：

$$I_{dzj} > I_g - I_{z0} \quad (1)$$

式中， I_{dzj} ——差动继电器执行元件的动作电流。

I_g 、 I_{z0} ——工作回路、中线制动回路实际电流；（图七所示）

$I_g - I_{z0}$ ——流入差动继电器执行元件的实际电流；

由图七可知：

$$I_g - I_{z0} = (U_g - U_{z0} \frac{R_g}{R_{j0} + R_{zd0}}) \frac{R_{j0} + R_{zd0}}{R_g R_{cdj} + R_g(R_{j0} + R_{zd0}) + R_{cdj}(R_{j0} + R_{zd0})}$$

$$\text{令 } R_{z0} = R_{j0} + R_{zd0},$$

$$\frac{1}{R_d} = \frac{R_{j0} + R_{zd0}}{R_g R_{cdj} + R_g(R_{j0} + R_{zd0}) + R_{cdj}(R_{j0} + R_{zd0})}$$

$$\text{则 } I_g - I_{z0} = (U_g - U_{z0} \frac{R_g}{R_{z0}}) \frac{1}{R_d} \quad (2)$$

代入(1)式则为

$$I_{dzj} > (U_g - U_{z0} \frac{R_g}{R_{z0}}) \frac{1}{R_d} \quad (3)$$

$$\because U_g = U_{z0}$$

$$\therefore \frac{R_g}{R_{z0}} > 1 - \frac{I_{dzj} \cdot R_d}{U_{z0}} \quad (4)$$

从(4)式可知，要满足发电机正常运行，差动保护电流回路断线时，继电器可靠不动作，就要求 $\frac{R_g}{R_{z0}} \geq 1$ ，即 $R_{z0} \leq R_g$ ，也就是说选择电阻 $R_{j0} + R_{zd0} \leq R_g$ 。

通过上面的计算可知，断线闭锁的制动特性为：①、当电流小于额定电流时，制动

四 整 定 计 算

按比率制动原理构成的具有折线制动特性的差动保护的整定计算是很简单的,只要明确几个数字就可以了,一般可按以下几步计算。

1. 确定制动系数, 对于发电机取 $K_z \geq 0.14$
2. 确定折线斜率 $m \geq K_z$, 即 $m \geq 0.14$ 。
3. 取无制动区, 即最小制动电流

$$I_{zd0} \geq I_e$$

4. 计算最小动作电流

$$\frac{I_{dmin}}{I_{zd0}} \geq K_z, \quad I_{dmin} \geq K_z \cdot I_{zd}$$

$$I_{dmin} \geq 0.14I_e \quad (\text{若 } K_z = 0.14)$$

以上有关推导就不再介绍。下面重点讨论关于断线制动回路中几个参数的整定及差动保护范围内、外两点(不同相)接地短路时的灵敏度问题。

(一) 关于断线制动回路的制动系数

要保证差动电流和中性线电流(制动电流)为同一电流时继电器可靠不动, 则要求制动系数 $K_{z0} > 1$, 整定时取 $K_{z0} \geq 1.1$, 可见此制动系数与整定计算中开始谈的 K_z 不一样, K_z 为外部故障时制动回路的制动系数。当外部故障时, 工作电流接近为零, 仅为不平衡电流, 而制动电流很大, 所以 $K_z < 1$ 。这里还应该指出 K_{z0} 是一变数, 因此 $K_{z0} \geq 1.1$ 是指中线电流为 $(1 \sim 1.05)I_e$ 时制动系数, 当中性电流小于 $(1 \sim 1.05)I_e$ 时, K_{z0} 会更大。

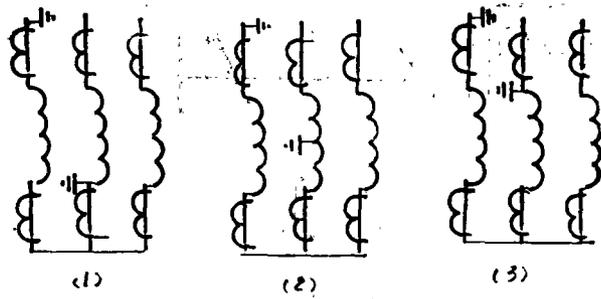
(二) 关于两点接地保护动作值的整定:

在两点接地时, 要求中线电流达到 $(1.15 \sim 1.2)I_e$ 时保护应可靠动作。为此当发生两点接地时保护的电流值 $I_{dz} = (1.15 \sim 1.2)I_e$, 为了提高灵敏度可取 $I_{dz} = 1.15I_e$ 。

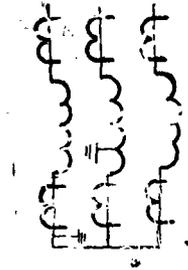
(三) 关于两点接地时保护灵敏度问题

对于发电机两点接地故障, 从整定值看较相间短路时的定值有较大的提高, 灵敏度自然大大的下降, 但是通过计算表明两点接地时装置灵敏度还是比较理想的, 这是由于故障点的特殊位置所决定的。从图九可见二个故障点的极限位置应为图九中的(1)和(3), (1)是一点位于引出线上, 另一点在根部, 相当于单相短路, (3)则是二点均位于出口, 一点在保护范围内, 一点在保护范围外, 相当于二相短路, 它们短接的电势都较高, 因此不会发生短接电势较低, 过渡电阻又大的情况。从对国产几种大型发电机短路计算结果(列于表一), 即使通过较大的过渡电阻故障, 其灵敏度也是相当理想的。

表一中 x 、 r 均为以额定参数为基准的标么值。对于图十所表示的故障情况则属于匝间短路保护范围, 即使如此, 在过渡电阻比较大的情况, 以国产12.5万千瓦机组为例, 如果单机未并网时发生故障, 采用内部短路实用算法计算, 其计算结果表明两点接地



图九 发电机不同相两点接地短路



图十 发电机两点接地故障

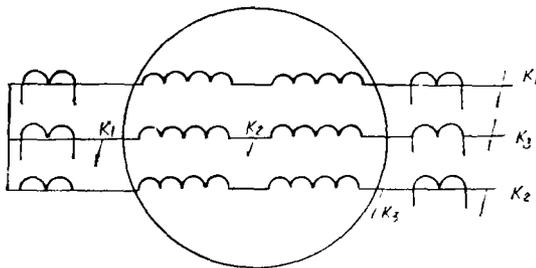
故障是可以可靠动作的，因此本文认为两点接地时保护定值采用 $(1.15 \sim 1.2) I_e$ 是允许的，一般不会发生保护灵敏度不足的情况。

表 1

型号	容量 MW	$\cos \varphi$	电压 kV	X_d''	X_2	X_0	r_f	r_g	$I_K^{(1)}$	$I_K^{(2)}$
									$1.2I_e$	$1.2I_e$
QFS-300-2	300	0.85	18	0.167	0.204	0.0892	0.00294	0.5	3.67	2.3
QFSS-200-2	200	0.85	15.75	0.1423	0.1735	0.0758	0.001811	0.5	3.93	2.43
QFS-125-2	125	0.85	13.8	0.18	0.22	0.069	0.003011	0.5	3.63	2.25
TQN-100-2	100	0.85	10.5	0.183	0.223	0.092	0.00113	0.5	3.54	2.23

表中故障计算、未考虑系统电源、即发电机并网前故障。

五 动模和工业试运行情况



图十一 两点接地试验图

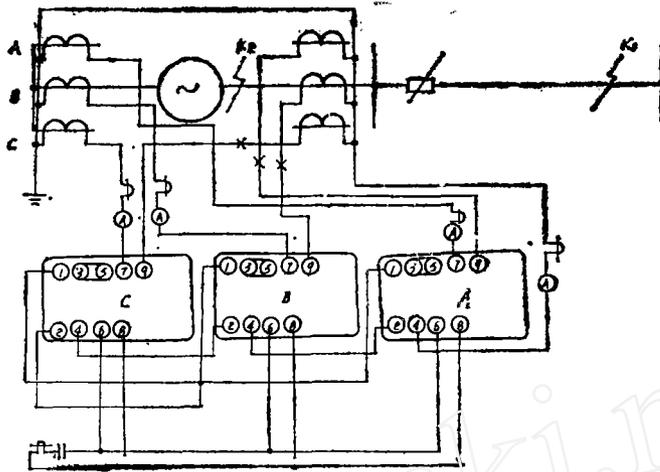
K_1-K_1 、 K_2-K_2 、 K_3-K_3

采用电流综合制动原理实现的发电机差动继电器LCD—8A，在许昌继电器研究所动模试验室进行了各种运行工况的动模试验，试验结果和试验接线分述如下。

(一) 动模试验接线

(二) 试验参数计算

1. 已知数据



K_1 为外部短路点、 K_2 为内部短路设置点；X——为C·T开路点

图十二 动模试验接线图

发电机： $P = 15$ 瓦， $U_c = 400$ V， $I_c = 21.65$ A，
 $X_s = 0.17$ ， $X_d = 0.537$ ， $X_g = 0.359$ ，
 $X_d' = 0.181$ ， $X_d'' = 0.0999$ ， $T_{d1} = 1.16$ ，
 $T_{d1}' = 0.226$ ， $T_{d1}'' = 0.022$

C·T变比：15/5 A

最大运行方式负荷电流（C·T二次）：5 A

最小运行方式负荷电流（C·T）二次：2.5 A

2. 计算负荷电阻

$$X_d = \frac{(400)^2}{15000} \times 0.537 = 5.728 \Omega$$

$$X_o = 0.6X_d'' = 0.06 \text{ (无阻尼绕组)}$$

$$X_o = \frac{(400)^2}{15000} \cdot 0.06 = 0.636 \Omega$$

$$X_d' = \frac{(400)^2}{15000} \cdot 0.181 = 1.93 \Omega$$

$$X_z = \sqrt{x_d' / x_d} = 0.2555 \text{ (无阻尼绕组)}$$

$$X_z = \frac{(400)^2}{15000} \cdot 0.255 = 2.72 \Omega$$

$$X_d'' = \frac{(400)^2}{15000} \cdot 0.0999 = 1.06 \Omega$$

最大运行方式：一次 $I_1 = 15$ A，则当 $U = 300$ 伏 $Z_z = 20 \Omega$ ，则 $Z_d = 14.27 \Omega$

最小运行方式：一次 $I_1 = 7.5$ A，则当 $U = 150$ 伏， $Z_z = 20 \Omega$ ，则 $Z_d = 14.27 \Omega$ 。

3. 计算短路电流

a) 最小运行方式内部短路:

$$X_1 = X_d = 5.728 \Omega, \quad X_2 = 2.72 \Omega, \quad X_0 = 0.636 \Omega$$

$$K_A^{(1)}: I_A^{(1)} = \frac{3 U_\phi}{X_1 + X_2 + X_0} = 76.3 \text{ A}$$

C·T二次电流: $I_{A2}^{(1)} = 25.4 \text{ A}$

$$K_{AB}^{(2)}: I_{AB}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} U_\phi}{X_1 + X_2} = 47.06 \text{ A}, \text{ 二次电流 } I_{AB2}^{(2)} = 15.7 \text{ A}$$

单相短路暂态电流:

$$I_A'' = I_\infty (1 + e^{-\frac{0.01}{T_d'}}) = 147.24 \text{ A}$$

$$I_{A2}'' = I_A'' / n = 49.74 \text{ A} \quad n = 3 \text{ (C·T变比)}$$

两相短路暂态电流:

$$I_{AB}'' = I_\infty (1 + e^{-\frac{0.01}{T_d'}}) = 92.05 \text{ A}$$

$$I_{AB2}'' = I_{AB}'' / n = 30.7 \text{ A}$$

b)、最大运行方式下外部短路:

$$X_1 = X_d + Z_s = 20 \Omega, \quad X_2 = 2.72 \Omega$$

$$K_{ABC}^{(3)}: I_{ABC}^{(3)} = \frac{U_\phi}{X_1} = 15 \text{ A}, \quad I_{ABC2}^{(3)} = 5 \text{ A}$$

$$K_{AB}^{(2)}: I_{AB}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} U_\phi}{X_1 + X_2} = 13.2 \text{ A}, \quad I_{AB2}^{(2)} = 4.4 \text{ A}$$

c)、最小运行方式下,不同相两点接地

$$X_{1\Sigma} = X_d = 5.728 \Omega, \quad X_{2\Sigma} = X_2 = 2.72 \Omega, \quad X_{0\Sigma} = X_0 = 0.636 \Omega$$

$$K_1 - K_1: I_K^{(11)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} - X_{0\Sigma})^2}} \cdot \frac{U_\phi}{X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}} = 58.5 \text{ A}$$

$$K_2 - K_2: I_K^{(11)}_1 = 108.4 \text{ A}, \quad I^{(11)}_{K2} = 19.5 \text{ A}$$

$$I^{(11)}_{K2} = 36.12 \text{ A}$$

$$K_3 - K_3: I_K^{(11)} = 58.6 \text{ A}, \quad I^{(11)}_{K2} = 19.5 \text{ A}$$

(三) 实验结果及其试验结果分析

1. 继电器整定值:

$$\text{整定动作值: } I_{d1} = 0.5 \text{ A}$$

$$\text{比率制系数 } K_{z1} = 0.3$$

$$\text{断相闭锁制动系数: } K_{z1} = 1.05$$

$$\text{两点接地时灵敏度: } I_{d2} = 1.15 I_d = 5.75 \text{ A}$$

2. 试验结果

a. 最大运行方式下, 外部短路

结论: 正确

表 2

短路形成	录波图电流	继电器行为
$K^{(3)}_{ABC}$	$I_A = I_B = I_C = 5 A$	不动作
$K^{(2)}_{AB}$	$I_A = I_B = 4.5 A$	"
$K^{(2)}_{BC}$	$I_B = I_C = 4.5 A$	"

b 最大运行方式、C·T开路

表 3

开路形式	录波图电流	继电器行为
A相C·T开路	$I_A = I_B = I_C = 5 A \quad I_0 = 3 A$	不动作
B相C·T开路	$I_A = I_B = I_C = 5 A \quad I_0 = 3 A$	"

结论：正确

c 最小运行方式、内部短路

表 4

短路形式	录波图电流	继电器行为
$K^{(2)}_{AB}$	$I_A = I_B = 17.5 A$	动作
$K^{(2)}_{BC}$	$I_B = I_C = 15 A$	"
$I^{(1)}_A$	$I_A = 30 A \quad I_0 = 25 A$	"
$I^{(1)}_C$	$I_C = 25 A \quad I_0 = 22 A$	"

d. 最小运行方式，不同相两点接地

结论：（1）、当发电机中性点接地时（考虑单电源接地线未拆除）此一种运行方式把一部分短路电源短接，造成继电器行为在 K_1-K_1 及 K_3-K_3 动作不符合要求，但继电器反映是正确的。

（2）、当发电机中性点不接地时（正常运行方式）继电器动作正确。

表 5

发 接 地 方 机 式	短路形式	录 波 电 流	继电器行为
接 地	K_1-K_1	$I_A = 25A \quad I_B = 11.5A \quad I_0 = 11A$	延迟很长时间 短时动作
	K_2-K_2	$I_A = 25A \quad I_C = 37A \quad I_0 = 20A$	动作
	K_3-K_3	$I_B = 20A \quad I_C = 12A \quad I_0 = 11A$	延迟很长时间 短时动作
不 接 地	K_1-K_1	$I_A = I_B = 28A \quad I_0 = 24A$	动作
	K_2-K_2	$I_B = I_C = 21A \quad I_0 = 17.5A$	"
	K_3-K_3	$I_B = I_C = 17.5A \quad I_0 = 15A$	"

e. 继电器断线闭锁回路断线时: 结论: 正确: 表 6

短 路 形 成	录 波 电 流	继 电 器 行 为
$K^{(2)}$ BC内	$I_B = I_C = 18A$	动 作
$K^{(2)}$ AB外	$I_A = I_B = 17.5A$	不 动 作

3. 试验结果分析:

- 继电器在外部短路、C·T开路及继电器断线回路开路时, 均能可靠不动作。
- 继电器在内部短路、两点接地、单相接地以及继电器回路开路时, 均能可靠动作。

(四) 现场运行报告

LCD—8 A 型发电机差动继电器样机经现场调试整定, 于1984年元月安装在平顶山姚孟电厂#2发电机上, 接信号位置投入试运行。

1984年4月23日上午10时40分, 继电器发出动作掉牌一次, 当时#2发电机负荷: $P = 290MW$, $Q = 125MVAR$, 系统无异常, 掉牌恢复后正常。随后又再送上直流保险时, 继电器出现动作掉牌信号, 后将触点灭火花电容器改为 $0.22\mu f$ 后(设计要求 $0.22\mu f$), 投入试运行至今, 再没有出现继电器动作掉牌信号。在此期间, 发电机没有发生过故障, 也没有发生过C·T二次回路断线。

1984年9月7日17点42分, 发生过一次区外故障, 故障点距发—变组高压侧220kV母线4kM处, 故障性质属于单相(B相)断线接地。最大短路电流220kV侧为10080A, 在此故障过程中, 继电器没有动作。

六 结 论

1. 利用电流综合制动原理实现的发电机差动保护, 通过理论分析, 以及动模试验。工业试运行表明, 该保护不仅具有灵敏度高、动作速度快的优点, 而且能保证发电机满载运行时二次电流回路断线时可靠制动, 而两点接地短路能可靠动作。

2. 利用电流综合制动原理实现为发电机差动保护简单, 易于实现, 是较理想的方案。

3. 采用电流综合制动方案只保证差动保护在电流回路断线时不误动作, 至于电流互感器断线时互感器本身如何保护仍应是需要解决的一个重要问题。