

断线闭锁装置

上海电力建设公司第二工程处 吴景信

断线闭锁装置(以下简称装置)作用是当电压互感器二次侧发生断线或短路时闭锁其他保护装置,并发出报警信号,而在一次系统发生故障时,装置一律不予以闭锁。被闭锁的保护通常有输电线路的某些距离保护,大型发电机的失磁保护等。

现行装置都是经接在电压互感器二次侧的零序电压滤过器推动执行元件来达到前一目的,而以电压互感器三次侧(开口三角)输出电压进行反闭锁来达到后一目的。

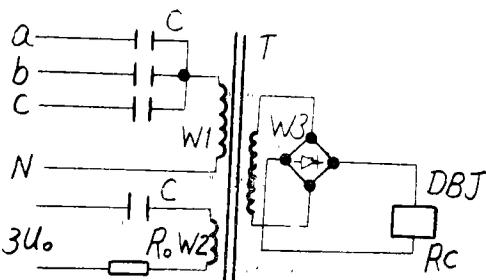
零序电压滤过器有用三只电容器组成(如BZ-21型, LH-11/b 附设装置等),也有用具有三个初级绕组的变压器和电阻元件组成(如BZ-22, DZ-22, DBY-1 型等)。反闭锁方式有用电压互感器二、三次侧零序电压在匹配变压器中产生反方向磁通来实现,也有用接在三次侧电压继电器接点来实现(如BZ-21型)。本文讨论重点是三电容器零序电压滤过器装置,但其分析方法及结论对其他类型装置多是实用的。

当一次系统发生故障时,中性点接地和不接地系统电压互感器二、三次侧零序电压比是不同的,在选用和调试装置时应当予以注意。

一、断线闭锁装置的几个电磁关系

通过对上海继电器厂LH-11/b 附设装置(图1)的试验分析,得出下列几个主要关系:

1. 一次系统故障时装置应不动作(即实现反闭锁)。



T $W_1 3000^T, R_{W1} 370^\Omega, W_2 1730^T,$
 $R_{W2} 280^\Omega, W_3 1650^T, R_{W3} 270^\Omega,$
 DBJ $2 \times 7000^T, R_c 2 \times 390^\Omega,$
 C $1^\mu, R_0 100^\Omega,$

图 1

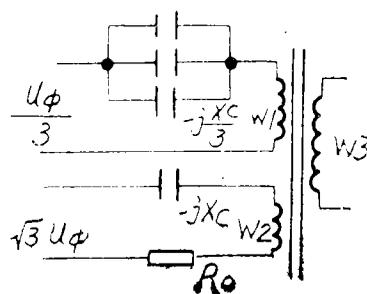


图 2

以一次系统单相接地为例,对大接地系统,当自故障点看出去零序阻抗和正、负序阻抗相等时,装置等值电路及其感受零序电压如图2所示。这时若使 W_1 、 W_2 所产生的合成磁通为零,则 W_3 输出电压为零。磁通为零意味着 W_1 、 W_2 回路感抗为零且安匝数相等,即:

$$\frac{\frac{1}{3}u\phi}{R_{w1}-j\frac{\times c}{3}}W_1 = \frac{\sqrt{3}u\phi}{R_0+R_{w2}-j\times c}W_2$$

$$\frac{W_1}{W_2} = \sqrt{3} \frac{3R_{w1}-j\times c}{R_0+R_{w2}-j\times c} \quad \text{应为实数}$$

$$\therefore R_0 = 3R_{w1} - R_{w2} \quad (1)$$

$$W_1 = \sqrt{3}W_2 \quad (2)$$

式中 $u\phi$ 电压互感器二次侧相电压(伏)。

R_{w1} 匹配变压器 T 绕组 W_1 直流电阻(欧姆)。

R_{w2} 匹配变压器 T 绕组 W_2 直流电阻(欧姆)。

W_1 、 W_2 匹配变压器 T 绕组 W_1 、 W_2 的匝数。

将图1中数值代入式(1),应有 $R_0 = 830\Omega$,但本装置实为 100Ω 。所以,尽管满足了式(2),装置仍不能可靠地实现反闭锁。

2.装置近似有

$$X_\mu = X_c = \frac{1}{2\pi fc} \quad (3)$$

式中 X_μ 为匹配变压器自 W_2 看进去的激磁电抗。不计铁损,不计电压互感器三次侧漏阻抗,激磁电抗 X_μ 和 $3u$ 回路阻抗构成一个并联谐振电路,其阻抗值为:

$$z = \frac{X_\mu [X_c + j(R_0 + R_{w2})]}{R_0 + R_{w2} + j(X_\mu - X_c)}$$

当谐振时,阻抗 z 达极大值并呈电阻性质,从而对执行元件分流最少。而这时阻抗 z 虚部为零,即:

$$I_\mu z - X_\mu \frac{(R_0 + R_{w2})^2 - X_c(X_\mu - X_c)}{(R_0 + R_{w2})^2 + (X_\mu - X_c)^2} = 0$$

$$\therefore X_\mu = \frac{(R_0 + R_{w2})^2}{X_c} + X_c$$

这就是该回路谐振参数配合条件。在本装置中: $X_c \doteq 3(R_0 + R_{w2})$,所以式(3)相当好地满足了回路谐振条件,从而也就使这两支路对执行元件分流最少。

*洛毕达法则是数学上用以求 $\frac{0}{0}$ 或 $\frac{\infty}{\infty}$ 不定型极限的一个定理,对本例中的 $\frac{\infty}{\infty}$ 型可叙述如下:

若 $X \rightarrow X_0$ 时有 $f(X)$, $\varphi(X) \rightarrow \infty$,且除 $X = X_0$ 外导数 $f'(X)$, $\varphi'(X)$ 存在,并 $\varphi'(X) \neq 0$ 则有

$$\lim_{X \rightarrow X_0} \frac{f(X)}{\varphi(X)} = \lim_{X \rightarrow X_0} \frac{f'(X)}{\varphi'(X)}$$

3.装置近似有

$$X_c = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 R_c \quad (4)$$

式中 W_1 匹配变压器 T 绕组 W_2 的匝数。

其目的是保证电压回路没有其他负荷时，电压互感器二次侧发生两相断线装置具有最大断线灵敏度。这个关系合理与否，后面还将进行讨论。

二、断线闭锁装置在各种运行方式下的行为

根据装置构成原理可知：

1. 正常运行时，系统无零序电压，电压互感器二、三次侧也无零序电压，装置不动作。

2. 当一次系统发生不带接地的相间故障时，电压互感器一、二、三次侧均无零序电压，装置不动作。

3. 当一次系统发生断线或接地故障时，一次系统有零序电压 U_0 存在（其数值取决于网络结构，参数以及故障形式和地点），电压互感器二次侧零序电压 $u_0 = \frac{U_0}{N}$ ，三次侧零序电压 $u_0' = 3 \frac{U_0}{N/\sqrt{3}} = 3\sqrt{3} \frac{U_0}{N}$ （大接地系统）或 $u_0' = 3 \frac{U_0}{\sqrt{3}N} = \sqrt{3} \frac{U_0}{N}$ （不接地系统）。式中 N 为电压互感器一次对二次变压比。可见：大接地系 $\frac{u_0'}{u_0} = 3\sqrt{3}$ 不接地系统 $\frac{u_0'}{u_0} = \sqrt{3}$ 均为常数。只要正确选用和调试装置，使之能以反闭锁，装置也不动作。

4. 电压互感器二次断线（一相或两相）或发生带接零的不对称相间故障时，二次侧负荷端出现零序电压，而三次侧电压为零，装置动作。

5. 电压互感器二次侧发生不接零的相间故障，二、三次均无零序电压，装置不动作。而当二次熔丝熔断或分相快速空气小开关脱扣后，转化为二次断线，装置才动作。

综合上述，装置只在电压互感器二次侧发生故障时才动作或延时动作，其他情况均不动作。电压互感器一次熔丝熔断时，发电机失磁保护可能动作，但装置不起闭锁作用，故仅用本装置来闭锁失磁保护是不够的。

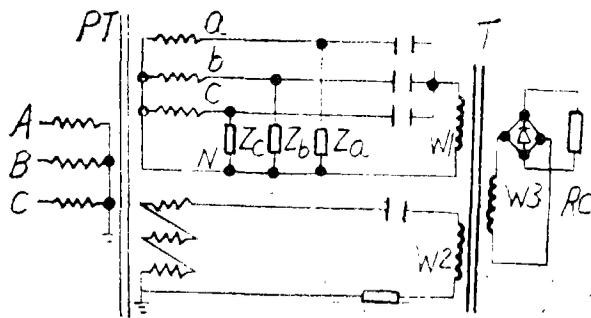


图 3

三、断线灵敏度讨论

图3为电压回路电路图。图中PT是电压互感器，A、B、C与一次系统相连，二次侧接有本装置及其他负荷等值阻抗 Z_a 、 Z_b 、 Z_c ，三次侧接有本装置 $3u_0$ 回路。

1. 二次断线时执行元件中的电流

不计变压器 T 激磁阻抗及 $3u_0$ 回路分流，不计PT及 T 的漏阻抗，二次断线时执行元件中的电流计算如下，

(1) 两相断线

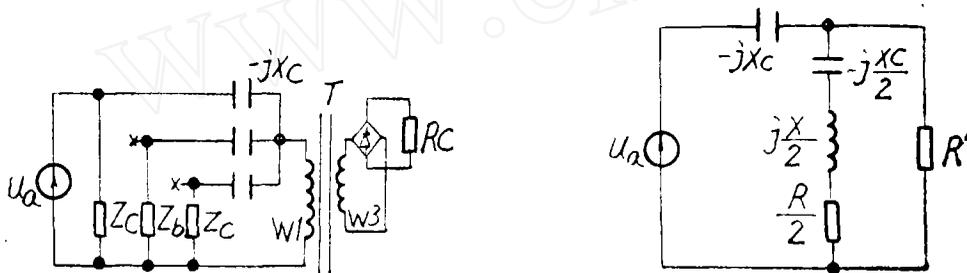


图4

电压互感器二次侧两相（如 b 、 c 相）断线时，图3.可以简化为图4。若令

$$Z_a = Z_b = Z_c = R + jX$$

并考虑到变压器下的阻抗折合

$$R' = R_{W1} + \left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2 (R_c + R_{W3} + R_z) = R'_c + R'_z \quad (5)$$

式中：

$$R'_c = \left(\frac{W_1}{W_3}\right) R_c, \quad R'_z = R_{W1} + \left(\frac{W_1}{W_3}\right)^2 (R_{W3} + R_z),$$

R_z 整流桥等值电阻。

则图4.又可简化为图5。应用赫一戴定理得 R' 上等值电压

$$u_2' = \frac{R + j(X - X_c)}{R + j(X - 3X_c)} u_a,$$

等值内阻抗

$$Z_2' = \frac{-jR + (X - X_c)}{R + j(X - 3X_c)} X_c,$$

流入执行元件的电流

$$I_2' = Bi \left| \frac{u_2'}{Z_2' + R'} \right| = Bi \left| \frac{R + j(X - X_c)}{(X - X_c)X_c + RR' + j(R'X - 3R'X_c - RX_c)} \right| u_{\phi 2} \quad (6)$$

式中，角标“2”是代表两相断线情况，引进整流系数 Bi 及取绝对值是经整流器之故。对单相整流桥 $Bi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0.9$ 。

(2) 单相断线

单相(如a相)断线时,图3可用上述方法简化为图6。应用赫一戴定理可得R'上等值电压

$$u_{1'} = -\frac{u_a}{2} \cdot \frac{R+j(X-X_c)}{R+j\left(X-\frac{3}{2}X_c\right)}$$

等值内阻抗

$$Z_{1'} = \frac{X-X_c-jR}{2R+j\left(2X-3X_c\right)} X_c$$

执行元件中的电流

$$I_{1'} = Bi \left| \frac{u_{1'}}{Z_{1'}+R'} \right| = Bi \left| \frac{R+j(X-X_c)}{(X-X_c)X_c+2RR'+j(2R'X-3R'X_c-RX_c)} \right| u_{\phi 1} \quad (7)$$

式中,角标“1”代表单相断线情况。

2. 电压互感器二次侧其他负荷对断线灵敏度的影响定义断线灵敏度

$$K_t = \frac{u_{\phi H}}{u_{\phi D}}$$

$u_{\phi H}$ 电压互感器二次侧相电压额定值(伏)。

$u_{\phi D}$ 二次侧一相或两相断线时,装置动作相电压值(伏)。

(1) 电压互感器二次侧无其他负荷,即 $R_c X \rightarrow \infty$ 。

应用洛毕达法则*,求 $R_c X \rightarrow \infty$ 时式(6)、(7)的极限便有

$$I'_{2^0} = Bi \left| \frac{u_{\phi 2}}{X_c(K-j)} \right| = Bi \frac{u_{\phi 2}}{X_c \sqrt{K^2+1}} \quad (8)$$

$$I'_{1^0} = Bi \left| \frac{u_{\phi 1}}{X_c(2K-j)} \right| = Bi \frac{u_{\phi 1}}{X_c \sqrt{4K^2+1}} \quad (9)$$

式中 $K = \frac{R'}{X_c}$, 角标“0”代表 $R_c X \rightarrow \infty$ 的情况。以前断线灵敏度元件测试大多模拟这种情况。

(2) 电压互感器二次短路,即 $R = X = 0$ 。

这时式(6)、(7)可简化为

$$I'_{2^K} = I'_{1^K} = Bi \left| \frac{u_{\phi}^K}{X_c(3K-j)} \right| = Bi \frac{u_{\phi}^K}{X_c \sqrt{9K^2+1}} \quad (10)$$

式中,角标“K”代表 $R = X = 0$ 的情况

(3) 当 $R_c X$ 均为有限数值时,根据式(6)、(7)可以作出执行元件电流和其他负荷等值阻抗关系曲线簇

$$I'_{K} = \text{常数} = f(R_c X)$$

同一些置在不同运行方式下执行元件动作电流都是相等的。比较式(8)、(9)、

(10)便有

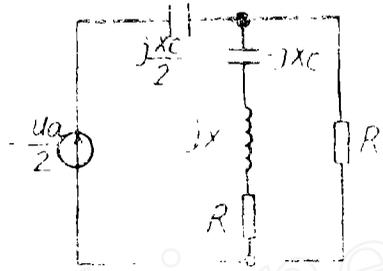


图6

$$\frac{Bi u \dot{\phi}_2}{X_c \sqrt{K^2 + 1}} = \frac{Bi u \dot{\phi}_1}{X_c \sqrt{2K^2 + 1}} = \frac{Bi u \dot{\phi}}{X_c \sqrt{9K^2 + 1}} \quad (11)$$

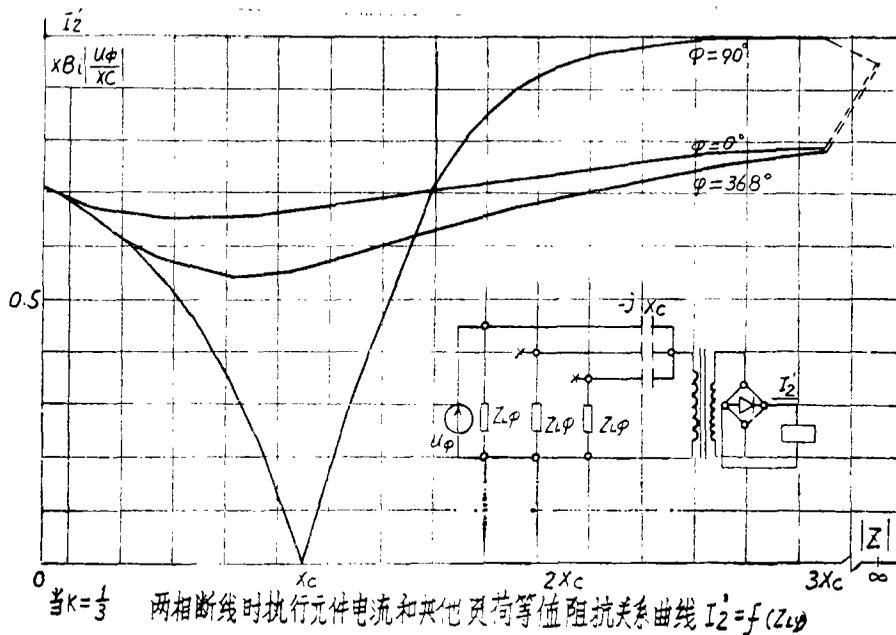
遍乘以 $\frac{X_c}{Bi u \dot{\phi}}$ 并稍加整理可得

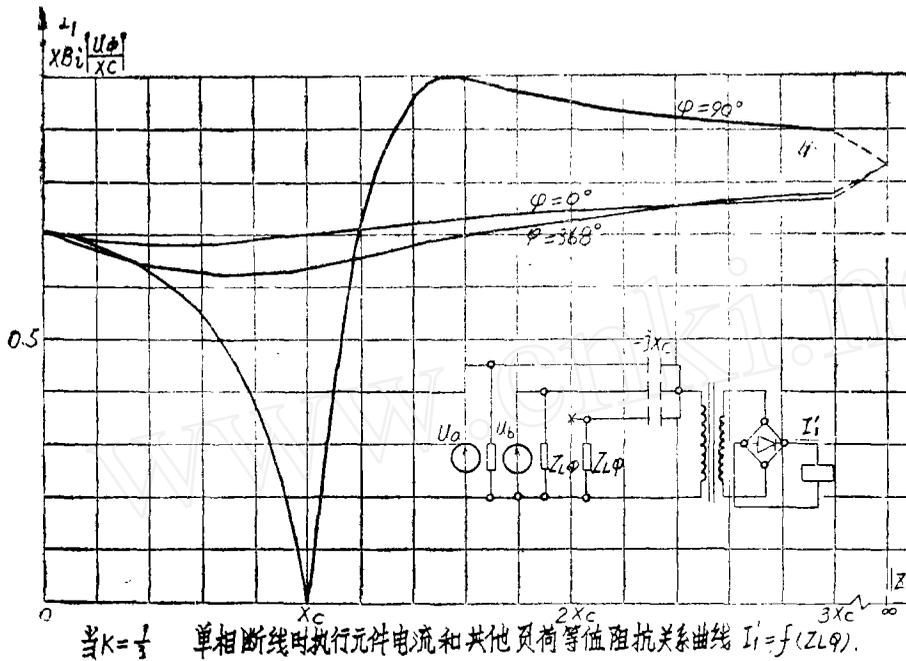
$$K_{L2}^{\circ} : K_{L1}^{\circ} : K_L^{\circ} = \frac{1}{\sqrt{K^2 + 1}} : \frac{1}{\sqrt{4K^2 + 1}} : \frac{1}{\sqrt{9K^2 + 1}} \quad (12)$$

式(12)表明,电压互感器二次无负荷断线灵敏度比二次短路高,无负荷两相断线灵敏度又比一相断线高,其高低程度取决于 $K = \frac{R'}{X_c}$ 的大小。这就告诉我们,一个装置即使无负荷断线灵敏度较高,也并非一定可以使用,因实际运用中其他负荷等值阻抗多在本装置阻抗十分之一以下(如一块LH-11/b距离保护屏 $|Z| = 100 \sim 300^{\circ}$, 一台 300^M^H 发电机组 $|Z| = 50 \sim 200^{\circ}$, 而本装置 $X_c = \frac{1}{2\pi f c} = 3180^{\circ}$), 这就使得实际情况很接近于二次短路,而这时装置具有几乎是最低的断线灵敏度。

$I'_R = \text{常数} = f(R, X)$ 曲线簇表明,当外负荷为电感时,由于和滤序器电容构成串联谐振分路,所以随着外阻抗的变化,执行元件中的电流将大幅度地变化着,负荷Q值越高,则变化愈甚。在急剧下降范围内将形成不灵敏区。不过基于上述理由,实际运用中一般不会进入不灵敏区,只有当负荷很轻,或者用增大电容C的容量来提高断线灵敏度时应该考虑这种可能性。

上述结果是基于 $Z_a = Z_b = Z_c$ 假定的,实际上各相阻抗会有所不同,因而不同相别断线灵敏度也就不尽相等。





3. 获得最大断线灵敏度的参数配合条件

前面已经说过，装置实际运用情况很接近于电压互感器二次短路，在不考虑串联谐振形成不灵敏区时，这种情况断线灵敏度也最低。所以，执行元件功率匹配只能根据这种运行方式来确定。根据式(10)可写出装置动作电流和动作电压关系如下：

$$I'_D = \frac{Biu_{\phi D}}{X_C \sqrt{9K^2 + 1}}, \text{ 遍乘以 } \frac{u_{\phi D}}{I'_D u_{\phi D}} \text{ 便有}$$

$$K_I = \frac{u_{\phi H}}{u_{\phi D}} = \frac{Biu_{\phi H}}{I'_D X_C \sqrt{9K^2 + 1}}$$

$$= \frac{Biu_{\phi H}}{I_D X_C \sqrt{9K^2 + 1}} \cdot \frac{W_1}{W_3} \quad (13)$$

式中 $I_D = I'_D \frac{W_3}{W_1}$ 执行元件动作电流。

$$\text{由式(5)} \quad R'_C = \left(\frac{W_1}{W_3} \right)^2 R_C = R' - R'_Z$$

$$\text{或} \quad \frac{W_1}{W_3} = \sqrt{\frac{KX_C - R'_Z}{R_C}} \quad (14)$$

将(14)代入(13)便有

$$K_I = \frac{Biu_{\phi H}}{I_D X_C} \sqrt{\frac{KX_C - R'_Z}{R_C(9K^2 + 1)}} \quad (15)$$

由 $\frac{dK_I}{dK} = 0$ 可得

$$9X_C K^2 - 18R'_Z K - X_C = 0$$

舍去负根

$$K = \frac{R'_\Sigma}{X_C} + \sqrt{\left(\frac{R'_\Sigma}{X_C}\right)^2 + \frac{1}{9}} \quad (16)$$

$$\text{或 } R'_C = \sqrt{R'^2_\Sigma + \frac{1}{9}X_C^2} \quad (17)$$

又 $\frac{d^2 K_L}{dK^2} < 0$, 故将式(16)代入式(15)可得最大断线灵敏度

$$K_{L.M} = 0.212 \frac{u \phi u}{I_D} \sqrt{\frac{1}{R_C \left(R'_\Sigma + \sqrt{R'^2_\Sigma + \frac{1}{9}X_C^2} \right)}} \quad (18)$$

式(17)就是获得最大断线灵敏度的参数配合条件。满足了这个条件之所以能获得最大断线灵敏度,其实质就是因为这种参数配合保证了执行元件功率匹配。式(4)虽然也在考虑功率匹配,但是它选择了在实际运用中不存在的,具有最大断线灵敏度运行方式来确定这种匹配,显然,这是不正确的。

式(18)表明,除了减小执行元件动作电流 I_D 之外,用其他方法(如减小 X_C)来提高断线灵敏度,其效果都是不显著的。

四、上海继电器厂LH—11/b附设断线闭锁装置存在问题及其改造

本装置存在两个主要问题

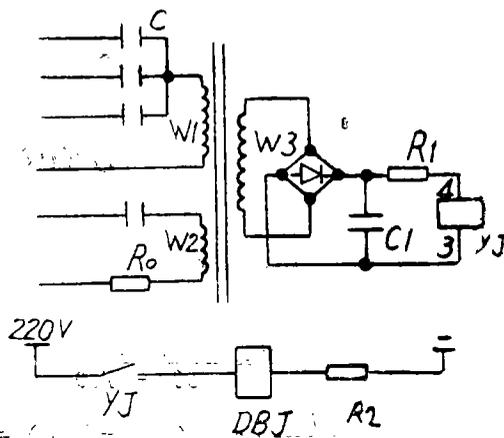
1. 装置功率匹配原则不正确,加上执行元件工艺粗糙,动作电流大,致使装置断线灵敏度太低;

2. 3 μ 回路电阻 R_0 配置与关系式(1)相悖,一次故障时,匹配变压器 T 中合成磁通不为零,不能可靠实现反闭锁。

针对上述存在问题,可有下列两种改造办法。

其一是以动作电流小的继电器(如极化继电器)取代原执行元件,把原执行元件作为重动中间继电器。 R_0 则按式(1)重新选用(图7)。这样可以获得很高的断线灵敏度,但增加元件多,改动大;所增加的极化继电器只能装在插件内部,运行检查也有不便之处。

其二是整修原执行元件以降低其动作电流,改变接线方式以改善功率匹配,完



- YJ RSC.522.006极化继电器用 W_2 ,
- R_1 $1.5k\Omega$, $1W$,
- C_1 $2M$, $\sim 50^\circ$ 油浸低介电容,
- R_0 820Ω , $3W$ 金属膜电阻
- R_2 $10k\Omega$, $10W$ 法郎电阻,。

图7

全利用原有元件进行较小改动以达到预期的目的。

具体方法是将原执行元件拆开，清除绕组铁芯柱与磁路铁件之间垃圾，使之密合，并对衔铁作适当矫正，则其动作电压可以达到出厂技术指标（6V）。为了改善功率匹配，匹配变压器的改接方案也是多种的，但以图8接线为最佳。图中原匹配变压器T仅作三次回路阻抗匹配和电隔离之用，这样不仅基本保证执行元件功率匹配，并且消除了二次断线时匹配变压器介入损耗。试验表明，在执行元件动作电压相同情况下，这种接线短路断线灵敏度比原接线提高了70%，当执行元件动作电压 $U_D = 6V$ 时，断线灵敏度 $K_2^{\circ} = 2.27$ ， $K_1^{\circ} = 1.77$ ， $K_L^{\circ} = 1.58$ ，这在实际运用中已经绰绰有余了。

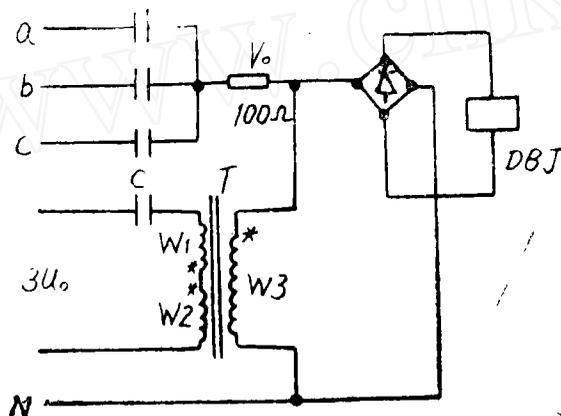


图8

一次故障时，要使装置可靠反闭锁，二、三次回路电流应该大小相等，方向相反。参照图2可得：

$$\frac{\frac{1}{3} u \phi}{r_0 - j \frac{X_c}{3}} = \frac{\sqrt{3} U \phi}{R_{W3} + h^2 (R_{W1} + R_{W2}) - j n^2 X_c}$$

式中 n 匹配变压器匝数比 $\frac{W_3}{W_1 - W_2}$ 。

由此不难求得：

$$\begin{cases} N = 4 \sqrt{3} = \frac{1650}{3000 - 1730}, \\ r_0 = \frac{R_{W3}}{3 \sqrt{3}} + \frac{1}{3} (R_{W1} + R_{W2}) = 269 \Omega, \text{ 取原 } R_0 (100 \Omega) \text{ 用之。} \end{cases}$$

试验表明，当 $3u_0$ 两端子加200V电压，二次端子a、b、c并联对N加38.4V时，执行元件上电压2.7V。多次拉合试验电源装置都能可靠反闭锁。 r_0 取用小值不仅是垂手可得，而也是在保证可靠反闭锁的前提下，减小了二次断线时功率损耗，提高了断线灵敏度。

五、断线闭锁装置试验方法及其原理

1. 测量执行元件动作电压(电流), 返回电压(电流), 检查机械部分有无卡涩现象, 检查接点接触情况。

2. 电磁回路平衡检查

目的: 检查零序电压滤过器的性能。对电容式滤过器检查三电容容量差是否过大, 对变压器式检查各相绕组匝数, 绕组连接, 平衡电阻调整是否有误。

方法: 外施对称的三相回线电源于装置相应端子, 并调至额定电压值, 测量执行元件线圈电压应为最少(通常为执行元件动作电压若干分之一)。试验时应注意电源电压对称性, 必要时可直接在电压互感器二次侧进行调试。

3. 断线灵敏度测试

目的: 检查电压互感器二次断线时装置动作可靠性。

方法: (1) 不计电压回路其他负荷

将装置 $3u_0$ 两端子短接, 依次断开 a 、 b 、 c 、 ab 、 bc 、 ca 相, 调节试验电压使执行元件动作, 并记录动作电压 $U_{\phi D}$ 。计算断线灵敏度 $K_L = \frac{u_{\phi H}}{u_{\phi D}}$ 。以前一般多这样做, 但实际意义不大, 因为电压互感器二次侧总是有其他负荷的。

(2) 模拟电压回路负荷极重情况

试验线路如图 9 所示。调节电压使执行元件动作, 记录动作电压 $u_{\phi D}^{\Delta}$ 。若短路断线灵敏度 $K_L^{\Delta} = \frac{u_{\phi H}}{u_{\phi D}^{\Delta}} > 1.5$ 即可。

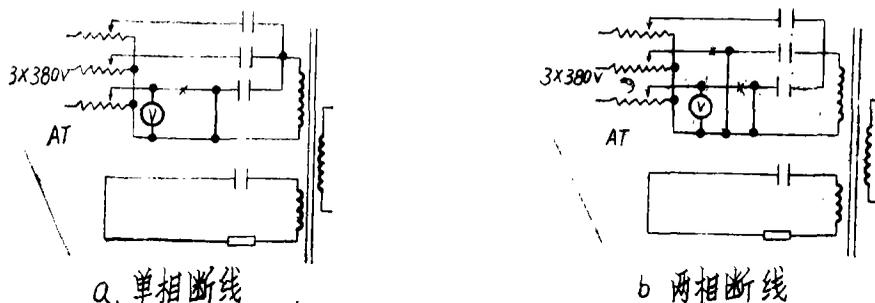


图 9

根据式(10)二次短路时二相断线灵敏度和一相断线灵敏度相等。所以可以只用单相电源模拟两相断线(图9.b), 而单相断线则略去不做。

4. 反闭锁回路调试

目的: (1) 检查装置二、三次回路参数配合是否正确。

(2) 检查并标定 $3u_0$ 回路极性端, 提供接线依据, 确保一次系统故障时, 装置很

可靠地实现反闭锁。

原理：根据短路电流计算，正常情况及一次系统A相接地时，电压互感器二、三次侧电压及其向量图列于表1。从表1可见：

(1)不接地系统一次出现零序电压时，三次和二次侧输出零序电压之比 $\frac{u'_0}{u} = \sqrt{3}$ ，而大接地系统为 $\frac{u'_0}{u} = 3\sqrt{3}$ 。这就决定了用于两个系统的装置参数必然不同，调试时表计读数也因之不同。

(2)不接地系统 $3U_0$ 输出 $U'_0 = 100$ ，大接地系统中随着 $X_{0\Sigma}$ 的变化， u'_0 值不同，当 $X_{0\Sigma} \gg X_{1\Sigma}$ 时 $U'_0 = 300$ ，这意味着中性点不接地，不会存在。但 $X_{0\Sigma}$ 数倍于 $X_{1\Sigma}$ ，尚有可能，故调试大接地系统用装置时，为检查装置反闭锁性能， $3u_0$ 应加压至 200 左右。

方法：接线图如图10所示。

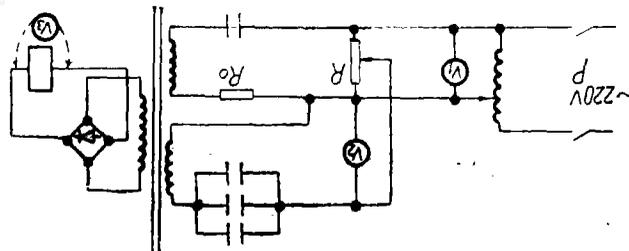


图10

对不接地系统用装置，用AT升压至 V_1 为 100 ，调节 R 使 V_2 为 57.7 ，则 V_3 读数应近于 0 。否则应更动 R 。当 V_3 读数很大时，应更换 $3u_0$ 端子极性。平衡后突然拉，合闸刀 p ，装置都不应动作。试验结束，标明极性端。

对大接地系统用装置，试验方法同上，仅注意 V_1 为 100 ， V_2 为 19.2 ，此后保持 R 分压比不变，升 V_1 至 200 ，突然拉，合闸刀 p ，装置应不动作。

5. 动作时间测定。根据需要进行，一般可以不动作。

6. 投产试验

目的：检查接线正确性；在具有零起升压条件时，测试装置用于系统中的断线灵敏度。

方法：(1)拉开电压互感器一相高压熔断器，模拟一次断线装置应不动作。本法在发电机组投产时进行比较方便，且不容易搞错。

(2)新投产输电线路不能采用上述方法，一则高压电压互感器断相困难，再则电压互感器还有其他负荷，不允许断相。这时装置投产试验可与零序功率方向继电器检查一并进行如下：

将 $3u_0$ L端断开并改接于 a 相抽头，同时断开二次侧 a 相并接 N (见图11)装置应动作。恢复二次侧 a 相接线，断开 b 、 c 相并接 N ，装置应不动作。

实际电压互感器 $3u_0$ 接线方法很多，中间抽头也各各不同，具体情况必须吃透，以

免误判断。试验完毕，恢复原有接纱

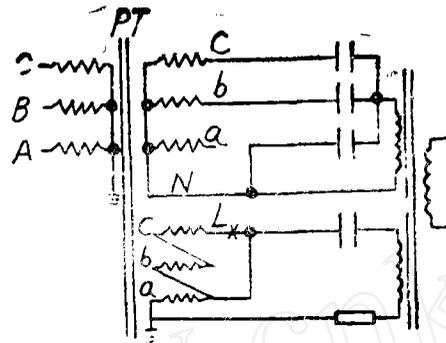


图11

	不接地系统		大接地系统			
	正常	A相接地	正常	A相接地		
				$X_{0\Sigma} = X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$	$X_{0\Sigma} = 3X_{1\Sigma} = 3X_{2\Sigma}$	$X_{0\Sigma} \rightarrow \infty$
电压互感器二次电压	 $U_0 = 0$	 $U_0 = U_\phi = 57.7V$	 $U_0 = 0$	 $U_0 = \frac{1}{3}U_\phi = \frac{100V}{3}$	 $U_0 = \frac{2\sqrt{3}}{15}U_\phi \cos 43.8^\circ = 34.6V$	 $U_0 = U_\phi$
电压互感器三次电压	 $U'_0 = 0$	 $U'_0 = \sqrt{3}U_\phi = 100V$	 $U'_0 = 0$	 $U'_0 = \sqrt{3}U_\phi = 100V$	 $U'_0 = \frac{6}{5}\sqrt{3}U_\phi \cos 43.8^\circ = 180V$	 $U'_0 = 3\sqrt{3}U_\phi = 300V$

表1 一次系统A相接地时电压互感器次级输出电压