

大型水轮发电机失磁保护新产品简介

许昌继电器研究所 张海荣

近年来,我国水轮发电机越来越多的投入运行,且单机容量不断增加。为适应大型水轮发电机在发生失磁故障时保护能可靠动作,我们比较了国内许多失磁方案,取长补短,研制了这套新型的失磁保护装置。

本方案由三只独立的继电保护(均为晶体管型)经外部端子配合构成。它们分别是BCY—1型直流励磁电压保护, BY—25型系统低压保护(用电流增量闭锁), BZ—9型失磁阻抗保护。保护方案的方框图如图一所示。

下面分别介绍三种保护的性能。

一、BCY—1型直流励磁电压保护

BCY—1型直流励磁电压保护(以下简称保护),是测发电机励磁电压降低或消失的保护。本装置实现以直流励磁电压动作值随发电机所带有功率自动变化的转子低电压判据作为发电机失磁判据之一。

本保护装置采用了转子电压随有功变化。

水轮发电机送至无限大系统母线的有功功率为:

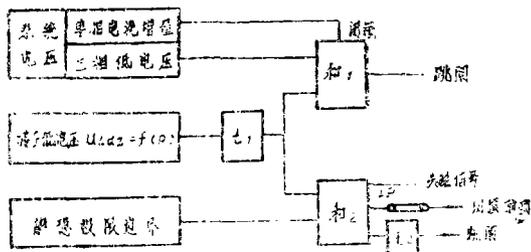
$$P = \frac{E_d U_{st}}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \cdot \frac{U_{st}^2}{2} \sin 2\delta \quad (1)$$

式中: U_{st} —无限大母线电压;

E_d —发电机同步电势;

$X_{d\Sigma} = X_d + X_{s\Sigma}$;

$X_{q\Sigma} = X_q + X_{s\Sigma}$;



图一、失磁保护方框图

δ — \dot{E}_d 与 \dot{U}_{st} 间的夹角即功率角。

保护装置的定期全部检验以及大修改进工作,要提前报出计划,以便做好充分准备。部分检验的安排,每年第四季度要提出下年度的计划,报有关部门安排。

8. 保护装置新装运行一年后,装置必须进行全部定期检验以保证和掌握保护装置的技术完好状态。

9. 做好保护装置的运行分析工作,及时总结典型的事故及不正常运行实例,不断完善保护装置。

在忽略发电机及传输线路损耗时，此P即为发电机输出有功功率。

发电机失磁达静稳边界时的条件为： $\frac{dP}{d\delta} = 0$ ，对(1)式求导，并令其等于零，

得：

$$\frac{E_{d_j} U_{s_j}}{X_{d\Sigma}} \cos \delta_j + \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} U_{s_j}^2 \cos 2\delta_j = 0 \quad (2)$$

式中 δ_j 、 E_{d_j} 分别是失磁达静稳边界时的静稳极限角及相对应的发电机同步电势，

$$E_{d_j} = -\frac{U_{s_j} (X_d - X_q)}{X_{q\Sigma}} \cdot \frac{\cos 2\delta_j}{\cos \delta_j} \quad (3)$$

设发电机失磁后达静稳边界前为等有功过程，故静稳边界时的有功功率亦为P。

$$P = \frac{E_{d_j} U_{s_j}}{X_{d\Sigma}} \sin \delta_j + \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \cdot \frac{U_{s_j}^2}{2} \sin 2\delta_j \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式，得达静稳边界时的有功：

$$P = 2 P_T \frac{\sin^3 \delta_j}{\cos \delta_j} \quad (5)$$

其中 P_T 为水轮发电机的凸板反应功率。

$$P_T = \frac{U_{s_j}^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \quad (6)$$

对给定的机组(X_d 、 X_q 一定)及给定的联系电抗($X_{d\Sigma}$ 一定)，利用(3)式及(5)式以 δ_j 为参变量，可以求出对应于不同初始有功功率P，失磁达临界失步时刻的 E_{d_j} 值。

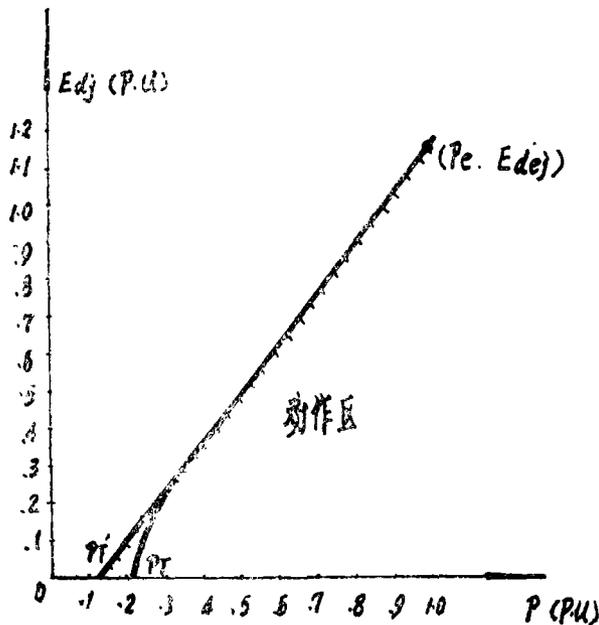


图 2

发生失磁后，当 $E_d < E_{d_j}$ 时，静稳极限破坏，发电机失步。如图2所示：

由图2可以看出，除了轻载部分的几点外，其它的点基本上处于一条直线。因此，在工程上可以用一条直线来代替水轮发电机的临界失步曲线，如图2中虚线所示。用直线代替临界失步曲线后，直线与P轴的的交点为 P'_T 而不再是 P_T 。图2中直线的方程为：

$$E_{d_j} = \frac{E_{d_{ej}}}{P_e - P'_T} (P - P'_T) \quad (7)$$

用过($P'_T, 0$)及($P_e, E_{d_{ej}}$)两点整定的直线，在低载运行区

域，其动作区会有所扩大，但整套保护不会误动。

E_d 为一虚构的同步电势，实际上无法测量，因失磁是由转子回路故障引起的，且转子励磁电压的测量却十分方便，应将 E_d 转换为转子励磁电压 U_L ，在忽略饱和及转差率 $S=0$ 的条件下，发电机的同步电势 E_d 与励磁电流 i_L 成正比，而励磁电流 i_L 与励磁电压 U_L 亦成正比关系。

在发电机空载时，励磁电压为 U_{L0} ，机端电压 U_F 即为发电机空载电势 E_{d0} 。因而有：

$$\frac{U_{Lj}}{E_{dj}} = \frac{U_{L0}}{E_{d0}} \quad (8)$$

式中： U_{Lj} ——发电机失磁过程中达临界失步时的励磁电压

$$\frac{U_{Lj}}{U_{L0}} = \frac{E_{dj}}{E_{d0}} \quad (9)$$

可见由式(3)及式(5)所求的 E_{dj} 标么值即为转子励磁电压 U_{Lj} 的标么值，所以转子低电压的整定值 U_{Lj} 可按式计算：

$$U_{Lj} = E_{dj} \cdot U_{L0}$$

以上论述是构成BCY-1型转子直流励磁电压保护的理论基础。

保护由直流变送元件，功率变送元件，晶体管逻辑电路及外附的励磁降压电阻构成，原理方框图见图3所示。

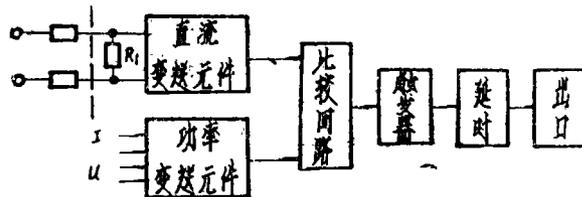


图3 直流励磁电压保护原理方框图

直流励磁电压通过外附的励磁降压电阻分压，从 R_1 得到一个反映励磁电压变化的弱电压量，送入直流变送元件，在其二次获得一个与一次系统隔离且与输入量成比例的直流电压量，作为制动量，该电压量通过比较回路，送到触发器。不正常运行时直流励磁电压降低，当低于整定值时，保护动作。

为了满足保护的動作值随发电机所带有功的大小而改变，使 $U_{Ldz} = f(P)$ ，功率变送元件将发电机所带有功($P = IU \cos \varphi$)的大小变换成与其成比例的直流电压量作为动作量引入比较回路。

下面分别叙述各部分工作原理：

a. 外附励磁降压电阻：

为了避免直流高压进入保护采用了取电阻分压的方式，在额定励磁电压时， R_1 两端电压约为 $5 \sim 7$ V。

b. 直流变换部分：

振荡器：为使直流变换部分有一调制信号，本产品采用多谐振荡器，振荡频率为 16.5 KHz。变压器 YB_1 的两绕组(9~10)、(11~12)分别接于振荡电路。而另外四绕组(1、2)、(3、4)、(5、6)、(7、8)则接于直流变送器的斩波回路和相敏检波回路。

直流变换部分原理见图4所示。

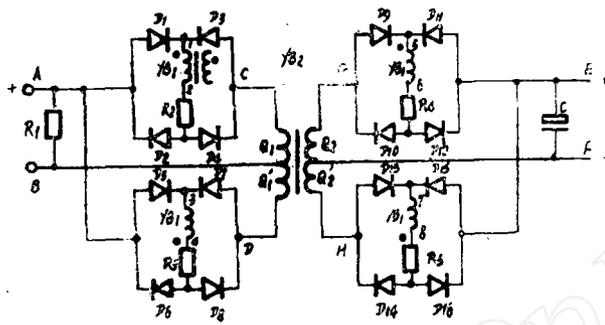


图4 直流变换部分原理图

直流励磁电压输入信号A (+)、B (-)。假如振荡器产生的交流信号瞬间处于黑点标志为正的方向,则D₅~D₈导通、隔离变压器YB₂的Q₁得电,电流流向是从A→D₅₋₈→D→Q₁→B。与此同时,YB₂付边得电D₁₃₋₁₄导通,电流方向是从H→D₁₃₋₁₆→E→F。若交流信号瞬间处于黑点标志为负的方向,则D₁₋₄导通,Q₁得电,电

流流向是从A→D₁₋₄→C→Q₁→B。同时YB₂付边得电,D₉₋₁₂导通,电流流向为C→D₉₋₁₂→E→F。综上所述,我们就可以在输出端得到E (+)F (-)、且与输入励磁高电压成线性变化的直流低压。经滤波后通过电位器整定,作为本保护的制动量。

由于直流变送部分输入端采用了分压方式,在额定励磁电压F、R₁上电压只有5V左右,即使某种原因产生的瞬间脉冲高压绝大部分被降在外附电阻上,加之D_{WF1-2}的保护作用,高压不至于引入保护而损坏元件。

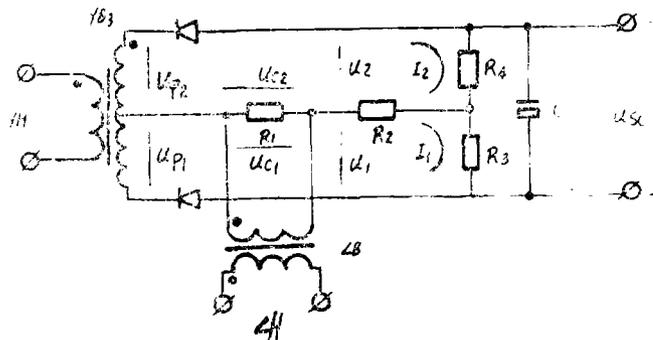


图5 功率变换器电气原理图

$$\dot{U}_{YH} \propto \dot{U}_{发} \quad \dot{I}_{YH} \propto \dot{I}_{发} \therefore \dot{U}_{YH} \times \dot{I}_{LH} \propto P_{发}$$

U_{YH} 通过YB₃付边的中心抽头取得两个电压 U_{P1} 、 U_{P2} ; I_{LH} 通过LB,在电阻R₁上也得到 U_{C1} 、 U_{C2} 两个半波电压($U_c = R_1 \cdot I_c$)。在第一个半波时,能得到 U_1 为 U_{P1} 及 U_{C1} 之差,在第二个半波时得到 U_2 为 U_{P2} 及 U_{C2} 之和即: $U_1 = U_{P1} - U_{C1}$

$$U_2 = U_{P2} + U_{C2}$$

这两个和差电压分别加到R₂上,R₂是一个非线性电阻或称函数发生器。它的特点是输出电流与输入电压的平方成正比。

$$即 I = KU^2$$

因此,当 U_1 、 U_2 通过R₂后,得到 I_1 、 I_2 有如下关系:

$$I_1 = KU_1^2 = K(U_{P1} - U_{C1})^2 = K(U_{P1}^2 + U_{C1}^2 - 2U_{P1}U_{C1})$$

直流励磁电压输入信号A (+)、B (-)。假如振荡器产生的交流信号瞬间处于黑点标志为正的方向,则D₅~D₈导通、隔离变压器YB₂的Q₁得电,电流流向是从A→D₅₋₈→D→Q₁→B。与此同时,YB₂付边得电D₁₃₋₁₄导通,电流方向是从H→D₁₃₋₁₆→E→F。若交流信号瞬间处于黑点标志为负的方向,则D₁₋₄导通,Q₁得电,电

c. 单相功率变换部分:

单相功率变换部分是将交流功率变换成直流电压量,采用和与差的平方原理如图6所示。

图中输入端YB₃、LB分别通过电压互感器YH和电流互感器LH接到发电机的输出端。

$$I_2 = KU_2^2 = K(U_{P2} + U_{C2})^2 = K(U_{P2}^2 + U_{C2}^2 + 2U_{P2}U_{C2})$$

这两个电流差的平均值从电阻 R_3 、 R_4 及滤波电容 C 上取出, 显然 $U_{sc} = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{R4} - U_{R3}) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (I_2 R_4 - I_1 R_3) dt$, 在参数设计时使 $R_3 = R_4 = R$

$$\begin{aligned} \therefore U_{sc} &= \frac{1}{T} \int_0^T R [K(U_P^2 + U_C^2 + 2U_P U_C) - K(U_P^2 + U_C^2 - 2U_P U_C)] dt \\ &= \frac{4KR}{T} \int_0^T U_P U_C dt \\ &= \frac{4KRR}{T} \int_0^T U_P I_C dt \end{aligned}$$

它直接反映了发电机的输出功率。

在电路中所使用的函数发生器是由稳压管及电阻组成。它们的导纳特性接近于平方关系, 本保护中使用了六级稳压管, 原理如图6所示。

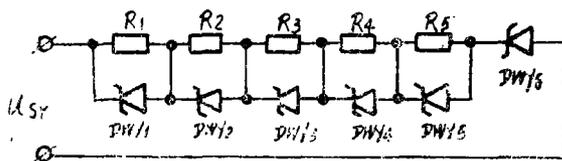


图6 函数发生器

图中各电阻是逐级减小的, 因此当输入电压逐渐增大(或减小)时, 稳压二极管将逐级击穿(或脱离击穿区), 从而使输出电流逐级逼近平方函数曲线。使用的稳压管越多, 就越接近平方关系, 测量的结果精度越高。

保护还考虑了YH与LH造成的残留相角, 利用阻容网络进行了补偿。

使用此保护装置, 只要计算出 U_{Lj} 及 P_{Tj} (折线点)即可进行整定。

二、BY—25型低电压保护

BY—25型低电压保护装置是判别发电机失磁的辅助判据之一, 本保护采用了电流增量闭锁系统低电压, 这样就可以有效的防止由于超高压输电线上发生三相短路, 而线路主保护或开关拒动造成的系统电压降低引起全部切机的严重后果。

保护由电流增量元件、三相低电压元件、晶体管逻辑回路构成。保护的原理方框图见图7, 三相低电压元件原理方框图见图8。

a. 电流增量元件

如果在超压输电线上发生三相短路, 线路主保护或开关拒动, 造成系统电压降低。虽然系统短路故障和发电机失磁故障都会使系统电压降低, 但前者的

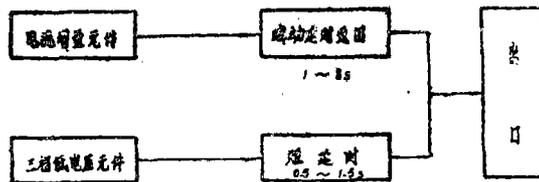


图7 低电压保护原理方框图

的 $\left| \frac{di}{dt} \right|$ 大, 而后者的 $\left| \frac{di}{dt} \right|$ 小, 即使是失磁故障中电量变化最大的开路失磁,

$\frac{di}{dt}$ 也远比系统短路故障时小的多。我们采用电流增量闭锁三相低电压元件, 就可以正

确区分是否是真正的失磁故障。从而保护有选择性的动作。

当正常运行时电流变换器一次侧始终有一稳态电流加入,无增量电流,增量的逻辑回路不动作。当有增量电流时($\Delta I \geq$ 整定值)、作逻辑回路瞬时动作,经1~8 S延时返回。

增量整定座设置在面板上,可以根据需要在2~5 A范围内任意整定。

b. 系统低电压元件

当系统电压同时降低到某一整定值时,保护动作。

本部分还设置了三个独立的整定座,可以对每相在面板上很方便的进行整定,整定范围为30~90 V。

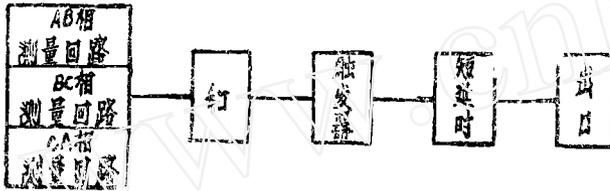


图8 三相低电压元件原理方框图

三、BZ—9失磁阻抗保护装置

BZ—9型失磁阻抗保护装置,是发电机失磁的定子判据。本保护以测量机端阻抗变化是否达到静稳极限边界,作为发电机失磁的主判据。

保护装置由阻抗元件,阻抗闭锁元件构成。原理方框图见图9所示。

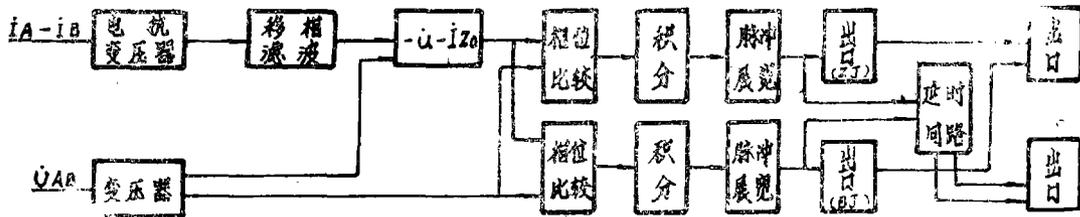


图9 失磁阻抗保护原理方框图

这种阻抗元件采用相位比较原理,经逻辑回路通过调整积分时间可以得到三种园,即,正园($\theta = 90^\circ$),苹果园($\theta < 90^\circ$),橄榄园($\theta > 90^\circ$)。水轮发电机使用的是苹果园,它不但应用于水轮发电机,同样应用于汽轮发电机,因为大型汽轮发电机的 x_d 并不等于 x_d' 。

上述三种产品可以与许继ZBX—2巡检装置配合实现自动检测,以便及时查出保护可能出现的拒动现象。而用自身的闭锁回路及时发现可能出现的元件损坏引起的误动,从而大大提高了保护的可靠性。