

# 大型汽轮发电机内部短路保护的定值分析

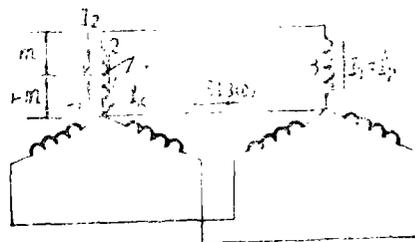
清华大学 王维俭

大型汽轮发电机的相间和匝间短路新型保护装置的研制工作已经取得显著成果，特别在灵敏度（或动作死区）方面提高很多。以纵差保护为例，最小动作电流可以减小为0.1额定电流，但是按照国家标准《电力设计技术规范》继电保护和自动装置篇第11条的要求，灵敏系数大于2.0即可。校验灵敏系数的条件是单机运行、机端二相金属性短路，根据这个要求，纵差保护的最小动作电流完全不必整定如此小。

规定灵敏系数的要求，目的在于保证保护区内发生经弧光电阻短路时，有关保护装置确能可靠动作，上述灵敏系数校验方法并不能达到这个目的，即使机端金属性二相短路有灵敏系数大于2.0，在发电机内部发生经弧光电阻的相间短路时完全可能拒动，直到故障继续发展，电机严重烧伤后，保护才动作。显然，这种动作性能对大型发电机来说是不能满足要求的。合理的灵敏系数校验条件应该是孤立运行的发电机在保护动作死区（例如5%）的边界经弧光电阻发生两相短路，此时灵敏系数应大于一定值（视内部短路电流计算正确程度而定）。这就要求比较正确地计算发电机内部短路电流的大小。本文目的在于详细分析一台大型汽轮发电机的内部相间和匝间短路，介绍它的理论分析方法和实用计算公式，并根据这些计算结果，提出有关保护的定值大小。

## 一、双丫定子绕组内部短路的基本关系式

设短路点 $K$ 将故障分支为1、2两部分，各占一分支总匝数的份额为 $1-m$ 和 $m$ ，非故障分支命名为3，它们的电流各为 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 和 $\dot{I}_3(=\dot{I}_2)$ ，如有中性点联线则其电流为 $3\dot{I}_{3,0}$ ， $\dot{I}_{3,0}$ 为 $\dot{I}_3$ 的零序分量。



### 1. 一分支匝间短路（发电机孤立运行）

图1 双丫定子绕组一分支匝间短路

若故障点在短路前的电压为 $\Delta\dot{U}_K$ ，则有短路后的故障分量电流为

$$I_{K(1)} = I_{K(2)} = I_{K(0)} = \frac{1}{3} I_K = \frac{\Delta U_K}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} \quad (1)$$

$$I_{1(i)} = \frac{Z_{22(i)} + Z_{12(i)}}{Z_{11(i)} + Z_{22(i)} + Z_{12(i)} + Z_{21(i)}} I_{K(i)} \quad (2)$$

$$I_{2(i)} = \frac{Z_{11(i)} + Z_{21(i)}}{Z_{11(i)} + Z_{22(i)} + Z_{12(i)} + Z_{21(i)}} I_{K(i)} = I_{3(i)} \quad (3)$$

式中  $i = 1, 2, 0$  (正、负、零序)

$Z_{11(i)} = X_{11(i)}$  回路1的自感抗,

$Z_{22(i)} = X_{22(i)}$  回路2的自感抗,

$Z_{12(i)} = X_{21(i)} = X_{12(i)} - X_{13(i)}$ ,

$X_{12(i)}$ 和 $X_{13(i)}$ 分别为回路1与回路2、3之间的互感抗。

$$Z_{(i)} = \frac{Z_{11(i)}Z_{22(i)} - Z_{12(i)}Z_{21(i)}}{Z_{11(i)} + Z_{22(i)} + Z_{12(i)} + Z_{21(i)}} \quad (4)$$

所以只要知道 $X_{11(i)}$ 、 $X_{22(i)}$ 、 $X_{12(i)}$ 、 $X_{13(i)}$ ，就可利用(1)~(4)计算内部匝间短路的各处电流了。但是这些参数的计算甚为复杂，具体计算公式见后面的算例。

## 2. 两分支间的匝间短路(发电机孤立运行)

短路点将两分支绕组分成四个回路1、2、4、5，与一分支匝间短路相比，仅将图1的回路3分成4和5，公式(1)~(4)仍成立，但其电抗参数已完全不同了，它们是：

$$Z_{11(i)} = X_{11(i)} - 2X_{14(i)} + X_{44(i)}$$

$$Z_{22(i)} = X_{22(i)} - 2X_{25(i)} + X_{55(i)}$$

$$Z_{12(i)} = Z_{21(i)} = X_{12(i)} - X_{15(i)} - X_{24(i)} + X_{45(i)}$$

且有  $\dot{I}_5 = \dot{I}_2$ ,  $\dot{I}_4 = \dot{I}_5 - \dot{I}_1 - \dot{I}_2$

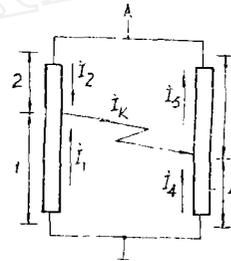


图1 两分支间匝间短路

## 3. 一个分支的两相短路(发电机孤立运行)

为简单起见，假定短路两相的两个分支的故障点完全对称，都是 $m$ 和 $1-m$ 两部分，这时

$$I_{K(1)} = I_{K(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_K = \frac{\Delta U_K}{Z_{(1)} + Z_{(2)}} \quad (1)'$$

公式(2)~(4)仍有效，但 $i = 1, 2$ 而 $i \neq 0$ 。

## 二、一台大型汽轮发电机的原始资料

为了对发电机内部短路进行理论分析和计算，首先要求出各个自感和互感电抗，为此需要下列资料。

### 1. 额定值

$$P_e = 600MW, \quad S_e = 705.882MVA, \quad U_e = 20KV, \\ I_e = 20.378KA,$$

### 2. 基本电抗参数

$$X''_d = 0.1963, \quad X_2 = 0.24, \quad X_0 = 0.111, \\ X_\delta = 0.1713, \quad X_d = 2.5363$$

### 3. 设计参数

$$AW_a = 138102\text{安匝}, \quad AW_\delta = 52500\text{安匝}, \quad \phi_1 = 813.33 \times 10^6 \text{ 马} \\ q = 7, \quad W_1 = 7, \quad Z_1 = 42, \quad \beta = 0.81, \\ K_{v1} = 0.956, \quad K_{p1} = 0.955, \quad K_{w1} = 0.913, \quad K_\delta = 1.13$$

### 4. 几何尺寸

$$D_i = 1340\text{mm}, \quad l_i = 6760\text{mm}, \quad r = 2102\text{mm}, \quad \delta = 90\text{mm}, \quad h_1 = 151.7\text{mm} \\ h_2 = 34.9\text{mm}, \quad h_3 = 18.8\text{mm}, \quad b_w = 48.5\text{mm}$$

$$r_1 = \frac{\pi D_i}{Z_1} = 100.23\text{mm}$$

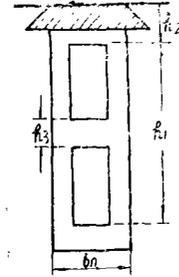


图3 定子槽几何尺寸

## 三、定子绕组的各种漏抗

为了计算各回路的自感和互感电抗，先得求出定子绕组各部分的漏抗。

### 1. 槽部自感漏抗

$$X_{s(1)} = X_{s(2)} = \frac{AW_a l_i \times 10^{-1}}{K^2_{w1} 3q \phi_1} \times \frac{3\beta + 1}{4} \left[ \frac{1}{2b_w} (5h_1 + h_3 + 12h_2) \right] = 0.0691$$

$$X_{s(0)} = \frac{AW_a l_i \times 10^{-1}}{K^2_{w1} 3q \phi_1} (3\beta - 2) \left[ \frac{1}{2b_w} (5h_1 + h_3 + 12h_2) \right] = 0.0347$$

### 2. 槽部互感漏抗

$$X_{sm(1)} = X_{sm(2)} = \frac{AW_a l_i \times 10^{-1}}{K^2_{w1} 3q \phi_1} \times \frac{9\beta^2 - 1}{8} \left[ \frac{1}{2b_w} (3h_1 - 3h_3 + 12h_2) \right] = 0.034$$

$$X_{sm(0)} = \frac{AW_a l_i \times 10^{-1}}{K^2_{w1} 3q \phi_1} (3\beta - 2)(6\beta - 5) \left[ \frac{1}{2b_w} (3h_1 - 3h_3 + 12h_2) \right] = 0.00334$$

### 3. 端部漏抗

$$X_{e(1)} = X_{e(2)} = 0.407 \left( \frac{w_1}{10} \right)^2 \times \frac{I_e}{U_e} \times \frac{1}{3P^2} \times K^2_{w1} D_i \times 10^{-3} = 0.0757$$

由于端部漏磁通中一部分交链许多线匝，而另一部分仅交链单线匝，近似地看作——与匝数平方成正比的部分

$$X_{e_m(1)} = X_{e_m(2)} = 0.8X_{e(1)} = 0.0606$$

——与匝数一次方成正比的部分

$$X_{e_s(1)} = X_{e_s(2)} \approx 0.2X_{e(1)} = 0.0151$$

至于端部零序漏抗可取为

$$X_{e(0)} \approx 0$$

#### 4. 差漏抗 $X_b$ = 相带谐波漏抗 $X_b$ + 齿谐波漏抗 $X_z$

$$X_{b(1)} = X_{b(2)} = 0.214 \frac{AW_s \tau l_t \times 10^{-3}}{\phi_1 \delta k_s} = 0.00506$$

$$X_{b(0)} = 0.9 \times \frac{AW_s}{AW_s} \times \frac{3\beta - 2}{K^2_{v1}} \left[ \frac{1}{27} + \frac{7}{18} \left( \beta - \frac{2}{3} \right) - \left( \beta - \frac{2}{3} \right)^2 \right] = 0.0804$$

$$X_{z(1)} = X_{z(2)} = 0.78 \left( \frac{1}{q} \right)^2 \times \frac{AW_s \tau l_t}{\phi_1 \delta K_s} \times 10^{-2} = 0.00376$$

$$X_{z_s(1)} = X_{z_s(2)} = \frac{2}{3\beta + 1} X_{z(1)} = 0.00219$$

$$X_{z_m(1)} = X_{z_m(2)} = X_{z_s(1)} \frac{3\beta - 1}{2} = 0.00157$$

$$X_{z(0)} = 0.9 \times \frac{AW_s}{AW_s} \times \frac{3\beta - 2}{K^2_{v1}} \left( \frac{1}{3q} \right)^2 = 0.00253$$

$$X_{z_s(0)} = \frac{X_{z(0)}}{2(3\beta - 2)} = 0.00294$$

$$X_{z_m(0)} = X_{z_s(0)}(6\beta - 5) = -0.00041$$

### 四、内部短路计算用的组合电抗

上述各种漏抗和电枢反应（正序暂态为 $X''_d - X_\sigma$ ，负序为 $X_2 - X_\sigma$ ）电抗中，有些和串联匝数的平方成正比，另一些则和串联匝数的一次方成正比，还有一部分是和同槽中上下层导体属同相或同分支或同回路的槽数有关的，经过这样分类组成的电抗我们称它为组合电抗，即

——与匝数平方有关的组合电抗为

$$\text{正序（暂态） } X''_d - X_\sigma + 0.8X_{e(1)} + X_{b(1)} = 0.09066$$

$$\text{负序 } X_2 - X_\sigma + 0.8X_{e(2)} + X_{b(2)} = 0.1344$$

$$\text{零序 } X_{b(0)} = 0.0804$$

——与匝数一次方有关的组合电抗为正序和负序

$$a [X_{z_s(i)} + X_{z_m(i)} + 0.2X_{e(i)}] = 0.1728, \quad i = 1, 2.$$

$$\text{零序 } a [X_{z_s(0)} + X_{z_m(0)}] = 0.075$$

$a$  为并联分支数,  $a = 2$ 。

——与同槽上下层导体的性质有关的组合电抗为

$$\text{正序和负序 } a [X_{i,m(1)} + X_{z,m(1)}] = 0.0711, \quad i = 1, 2。$$

$$\text{零序 } a [X_{i,m(0)} + X_{z,m(0)}] = -0.0075$$

## 五、定子槽上下层导体分布情况

槽数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
上层	$A_1$	$A_1$	$A_1$	$A_1$	$A_1$	$A_1$	$A_1$	$C'_1$						
下层	$A_2$	$A_2$	$A_2$	$C'_2$	$B_2$	$B_2$	$B_2$	$B_2$						
槽数	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
上层	$B_1$	$B_1$	$B_1$	$B_1$	$B_1$	$B_1$	$B_1$	$A'_2$						
下层	$B_2$	$B_2$	$B_2$	$A'_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$C_1$						
槽数	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
上层	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$C_2$	$B'_2$						
下层	$C_1$	$C_1$	$C_1$	$B'_1$	$A_2$	$A_2$	$A_2$	$A_2$						

## 六、一个分支 ( $A_1$ ) 第七图匝间短路时各回路自感和互感电抗及短路电流计算

利用前两节的组合电抗和同槽上下层导体分布情况的  $Q_i$  数, 可以按下式计算各序自感和互序电抗。

正序:

$$X_{11(1)} = \alpha_1 [X''_d - X_\sigma + 0.8X_{e(1)} + X_{b(1)}] + \alpha_1 a [X_{z1(1)} + X_{z2(1)} + 0.2X_{e(1)}] + \frac{Q_1}{Q} a [X_{i,m(1)} + X_{z,m(1)}] = 0.02656$$

$$X_{22(1)} = d^2_2 [X''_d - X_\sigma + 0.8X_{e(1)} + X_{b(1)}] + \alpha_2 a [X_{z1(1)} + X_{z2(1)} + 0.2X_{e(1)}] + \frac{Q_2}{Q} a [X_{i,m(1)} + X_{z,m(1)}] = 0.2147$$

$$X_{12(1)} = \alpha_1 \alpha_2 [X''_d - X_\sigma + 0.8X_{e(1)} + X_{b(1)}] + \frac{a}{2} \times \frac{\theta_1 - \theta_1 - Q_2}{Q} [X_{i,m(1)} + X_{z,m(1)}] = 0.0111$$

$$X_{13(1)} = \alpha_1 [X''_d - X_\sigma + 0.8X_{e(1)} + X_{b(1)}] + \frac{a}{2} \times \frac{Q_1}{Q} [X_{z,m(1)} + X_{z,m(1)}] = 0.0189$$

负序: 除以  $X_2$  替代  $X''_d$  外, 其余完全同正序

$$X_{11(2)} = 0.02746$$

$$X_{22(2)} = 0.247$$

$$X_{12(2)} = 0.0165$$

$$X_{13(2)} = 0.0251$$

零序：没有与匝数平方有关的定子电枢反应电抗，且端部漏抗  $X_{s(0)} = 0$

$$X_{11(0)} = \alpha^2 X_b(0) + \alpha_1 a [X_{1s(0)} + X_{2s(0)}] + \frac{Q_1}{Q} a [X_{1m(0)} + X_{2m(0)}] = 0.01237$$

$$X_{22(0)} = \alpha^2 X_b(0) + \alpha_2 a [X_{1s(0)} + X_{2s(0)}] + \frac{Q_2}{Q} a [X_{1m(0)} + X_{2m(0)}] = 0.1233$$

$$X_{12(0)} = \alpha_1 \alpha_2 X_b(0) + \frac{a}{2} \times \frac{Q_1 - Q_1 - Q_2}{Q} [X_{1m(0)} + X_{2m(0)}] = 0.00985$$

$$X_{13(0)} = \alpha_1 X_b(0) + \frac{a}{2} \times \frac{Q_1}{Q} [X_{1m(0)} + X_{2m(0)}] = 0.01087$$

最后得计算用自感和互感电抗为

$$Z_{11(1)} = X_{11(1)} = 0.02656$$

$$Z_{22(1)} = X_{22(1)} = 0.2147$$

$$Z_{12(1)} = Z_{21(1)} = X_{12(1)} - X_{13(1)} = -0.0078$$

$$Z_{11(2)} = 0.02746 = X_{11(2)}$$

$$Z_{22(2)} = 0.247 = X_{22(2)}$$

$$Z_{12(2)} = Z_{21(2)} = X_{12(2)} - X_{13(2)} = -0.0086$$

$$Z_{11(0)} = X_{11(0)} = 0.01237$$

$$Z_{22(0)} = X_{22(0)} = 0.1233$$

$$Z_{12(0)} = Z_{21(0)} = X_{12(0)} - X_{13(0)} = -0.00102$$

各序总电抗为

$$Z_{(1)} = \frac{Z_{11(1)}Z_{22(1)} - Z_{12(1)}^2}{Z_{11(1)} + Z_{22(1)} + 2Z_{12(1)}} = 0.025$$

$$Z_{(2)} = \frac{Z_{11(2)}Z_{22(2)} - Z_{12(2)}^2}{Z_{11(2)} + Z_{22(2)} + 2Z_{12(2)}} = 0.0261$$

$$Z_{(0)} = \frac{Z_{11(0)}Z_{22(0)} - Z_{12(0)}^2}{Z_{11(0)} + Z_{22(0)} + 2Z_{12(0)}} = 0.0114$$

匝间短路处各序电流为

$$I_{k(1)} = I_{k(2)} = I_{k(0)} = \frac{\Delta U_k}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} = \frac{0.143}{0.025 + 0.0261 + 0.0114} = 2.288$$

零序电流型横差保护中流过的电流为

$$3 \dot{I}_{s(0)} = 3I_{2(0)} = 3I_{k(0)} \frac{Z_{11(0)} + Z_{12(0)}}{Z_{11(0)} + Z_{22(0)} + 2Z_{12(0)}} = 0.583$$

零序电压型横差保护中的零序电压为

$$U_{(0)} = I_{k(0)} Z_{(0)} = 0.0261$$

量据这样的分布情况，就可知道：

一个分支（例如  $A_1$ ）中同槽同相的槽数  $Q = 6$ ，没有同槽同分支的定子槽，

故  $Q_1 = 0$ 。

当  $A_1$  分支的第七圈（定子槽 7 的上层和 24 的下层）被短路时， $A_1$  被分成两部分，各占分支总匝数的  $\alpha_1 = 1/7 = 0.143$ ， $\alpha_2 = 6/7 = 0.857$ 。因为没有同槽上下层导体同属分支  $A_1$  或回路 1 或回路 2 的定子槽，故  $Q_1 = 0$ ， $Q_1 = 0$ ， $Q_2 = 0$ ；也没有同槽上下层导体分属回路 1 和 2 的定子槽，故  $Q_{12} = 0$ 。非故障分支  $A_2$ （命名为回路 3）与回路 1 同槽的定子槽数为  $Q_{13} = 1$ （第 24 槽），与回路 2 同槽的定子槽数为  $Q_{23} = 5$ （第 1、2、3、22、23、槽）。

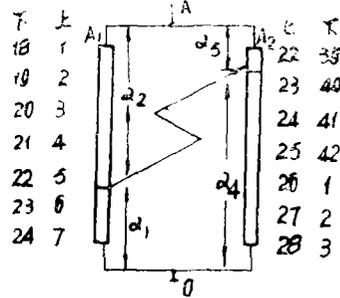


图4 A相绕组分布

当第 22 槽上下层导体短路时，即同相的两个分支间发生匝间短路， $A_2$  分支也被分成两部分  $\alpha_4$  和  $\alpha_5$ （图 4），此时

$\alpha_1 = 2/7 = 0.286$ ， $\alpha_2 = 5/7 = 0.714$ ， $\alpha_3 = 0.5/7 = 0.0714$ ， $\alpha_4 = 6.5/7 = 0.9286$   
 这时  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_5 = Q_4 = 0$ ， $Q_{14} = 2$ （第 23、24 槽）， $Q_{25} = 1$ （第 22 槽）， $Q_{24} = 3$ （第 1、2、3 槽）， $Q_{15} = 0$ ， $Q_{12} = 0$ ， $Q_{45} = 0$ 。

## 七、A 相两分支间的匝间短路计算

以定子第 22 槽上下层导体短路为例，利用第四、第五小节的计算数据，可得正序

$$X_{11(1)} = \alpha_1^2 \times 0.09066 + \alpha_1 \times 0.1728 = 0.0568, \quad (\alpha_1 = 0.286 \text{ 且 } Q_1 = 0)$$

$$X_{22(1)} = \alpha_2^2 \times 0.09066 + \alpha_2 \times 0.1728 = 0.1696, \quad (\alpha_2 = 0.714 \text{ 且 } Q_2 = 0)$$

$$X_{55(1)} = \alpha_3^2 \times 0.09066 + \alpha_3 \times 0.1728 = 0.0128, \quad (\alpha_3 = 0.0714 \text{ 且 } Q_5 = 0)$$

$$X_{44(1)} = \alpha_4^2 \times 0.09066 + \alpha_4 \times 0.1728 = 0.2386, \quad (\alpha_4 = 0.9286 \text{ 且 } Q_4 = 0)$$

$$X_{12(1)} = \alpha_1 \alpha_2 \times 0.09066 = 0.0185, \quad (Q_{12} = 0)$$

$$X_{14(1)} = \alpha_1 \alpha_4 [X''_d - X_\sigma + 0.8X_{11} + X_{b(1)}] + \frac{a}{2} \times \frac{Q_{14}}{Q} [X_{1m} + X_{1m(1)}] = 0.036, \\ (Q_{14} = 2)$$

$$X_{15(1)} = \alpha_1 \alpha_5 \times 0.09066 = 0.00185, \quad (\because Q_{15} = 0)$$

$$X_{24(1)} = \alpha_2 \alpha_4 \times 0.09066 + \frac{1}{2} \times \frac{3}{6} \times 0.0711 = 0.0779, \quad (\because Q_{24} = 3)$$

$$X_{25(1)} = \alpha_2 \alpha_5 \times 0.09066 + \frac{1}{2} \times \frac{1}{6} \times 0.0711 = 0.0106, \quad (\because Q_{25} = 1)$$

$$X_{45(1)} = \alpha_4 \alpha_5 \times 0.09066 = 0.006, \quad (\because Q_{45} = 0)$$

负序（完全与正序相似，仅以 0.1344 代替 0.09066）

$$X_{11(2)} = 0.0604, \quad X_{22(2)} = 0.1919, \quad X_{55(2)} = 0.013, \quad X_{44(2)} = 0.2764$$

$$X_{12(2)} = 0.02745, \quad X_{14(2)} = 0.0476, \quad X_{15(2)} = 0.00275, \quad X_{24(2)} = 0.1069$$

$$, X_{452} = 0.00891,$$

零序

$$X_{11(0)} = \alpha_1^2 \times 0.0804 + \alpha_1 \times 0.075 = 0.028$$

$$X_{22(0)} = \alpha_2^2 \times 0.0804 + \alpha_2 \times 0.075 = 0.0945$$

$$X_{55(0)} = \alpha_5^2 \times 0.0804 + \alpha_5 \times 0.075 = 0.00536$$

$$X_{44(0)} = \alpha_4^2 \times 0.0804 + \alpha_4 \times 0.075 = 0.139$$

$$X_{12(0)} = \alpha_1 \alpha_2 \times 0.0804 = 0.0164$$

$$X_{14(0)} = \alpha_1 \alpha_4 \times 0.0804 + \frac{1}{2} \times \frac{2}{6} (-0.075) = 0.02$$

$$X_{15(0)} = \alpha_1 \alpha_5 \times 0.0804 = 0.00164$$

$$X_{24(0)} = \alpha_2 \alpha_4 \times 0.0804 + \frac{1}{2} \times \frac{3}{6} (-0.0075) = 0.0514$$

$$X_{25(0)} = \alpha_2 \alpha_5 \times 0.0804 + \frac{1}{2} \times \frac{1}{6} (-0.0075) = 0.00347$$

$$X_{45(0)} = \alpha_4 \alpha_5 \times 0.0804 = 0.00533$$

$$Z_{11(1)} = X_{11(1)} - 2X_{14(1)} + X_{44(1)} = 0.2234$$

$$Z_{22(1)} = X_{22(1)} - 2X_{25(1)} + X_{55(1)} = 0.1612$$

$$Z_{12(1)} = Z_{21(1)} = X_{12(1)} - X_{15(1)} - X_{24(1)} + X_{45(1)} = -0.05525$$

同样有

$$Z_{11(2)} = 0.2416, \quad Z_{22(2)} = 0.1793, \quad Z_{12(2)} = Z_{21(2)} = -0.0733$$

$$Z_{11(0)} = 0.127, \quad Z_{22(0)} = 0.0929, \quad Z_{12(0)} = Z_{21(0)} = -0.0313$$

各序总电抗为

$$Z_{(1)} = \frac{Z_{11(1)} Z_{22(1)} - Z_{12(1)}^2}{Z_{11(1)} + Z_{22(1)} + 2Z_{12(1)}} = \frac{0.03296}{0.2741} = 0.1202$$

$$Z_{(2)} = \frac{0.2416 \times 0.1793 - (0.0733)^2}{0.2416 + 0.1793 - 0.1466} = \frac{0.03795}{0.2743} = 0.1383$$

$$Z_{(0)} = \frac{0.127 \times 0.0929 - (0.0313)^2}{0.127 + 0.0929 - 0.0626} = \frac{0.0108}{0.1573} = 0.0688$$

$$I_{k(1)} = I_{k(2)} = I_{k(0)} = \frac{(\alpha_4 - \alpha_1)E}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_5)E}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} = \frac{0.6426}{0.3273} = 1.963$$

$$I_{1(0)} = I_{k(0)} \frac{Z_{22(0)} + Z_{12(0)}}{Z_{11(0)} + Z_{22(0)} + 2Z_{12(0)}} = 1.963 \times \frac{0.0616}{0.1573} = 0.7687$$

$$I_{2(0)} = I_{k(0)} \frac{Z_{11(0)} + Z_{12(0)}}{Z_{11(0)} + Z_{22(0)} + 2Z_{12(0)}} = 1.963 \times \frac{0.0957}{0.1573} = 1.194$$

$$I_{4(0)} = I_{1(0)} = 0.7687$$

零序电流型横差保护中的电流为

$$3I_{4(0)} = 2.306$$

零序电压型横差保护的电压为

$$U_0 = I_{k0} Z_{00} = 0.135$$

## 八、BC两相各一个分支发生相间短路

设两相的故障分支短路点完全对称，且有 $\alpha_1 = 0.143$ ， $\alpha_2 = 0.857$ 。这时各序电抗参数可沿用第六小节的数据，唯与零序参数无关，即

$$Z_{11} = 0.025, \quad Z_{22} = 0.0261$$

$$I_{k(1)} = I_{k(2)} = \frac{\Delta U_k}{Z_{11} + Z_{22}} = \frac{0.143}{0.0511} = 2.798$$

此时流过纵差保护的电流为短路处电流，

$$\text{即 } I_k = \sqrt{3} I_{k(1)} = 4.846$$

## 九、发电机内部短路的实用计算法

前几节介绍的内部短路计算方法过于复杂，而且需要大量的发电机结构尺寸和设计参数，因此在继电保护的整定计算工作中，除有特殊需要外，实际很难普遍采用。这种理论计算的基本正确已为工业试验证明（已有另文讨论），所以它可以作为实用计算法的理论依据和校验准确度的参考。

从理论分析计算中可以发现， $Z_{12}$ 总是比 $Z_{11}$ 和 $Z_{22}$ 小很多，这就有可能在实用计算中省略各种互感的考虑。进一步希望能通过发电机的常用参数（ $X''_d$ ， $X'_d$ ， $X_d$ ， $X_2$ ， $X_0$ ， $X_c$ ）直接计算发电机内部短路问题。华中工学院在这方面作了许多工作。下面我们就应用简化的实用计算法计算大型汽轮发电机的匝间短路和相间短路。

将一个分支的匝间短路视为短路匝数相同的对中性点的单相短路，其等效电路如图5。

两分支之间的匝间短路（图4）视为短路匝数为 $\alpha_4 - \alpha_1 = \alpha_2 - \alpha_3$ 的一个分支单相对中性点短路，所以等效电路仍为图5。

一分支的两相短路（两相的短路点完全对称），与零序无关，其等效电路只是图5中没有零序分部，当然正序网应与负序网并联。

等效电路中的各序电抗参数是这样考虑的：正（负）序的电枢反应电抗（ $X''_d - X_c$ 和 $X_2 - X_c$ ）是与匝数平方成正比的，零序没有电枢反应电抗，定子漏抗 $X_c$ 中的一部分 $RX_c$ （ $R < 1$ ，大型汽轮发电机 $R \approx 0.5 \sim 0.6$ ）与匝数一次方成正比， $(1 - R)X_c$ 与匝数平方成正比，因此有

$$X_{s(1)} = [\alpha^2(X''_d - RX_c) + \alpha \cdot RX_c] \times 2,$$

$$X_{f(1)} = 2X''_d - X_{s(1)}, \quad X_{r(1)} = 2X''_d,$$

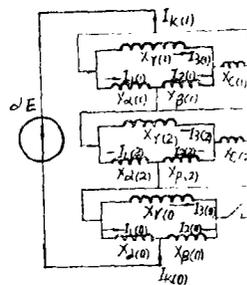


图5 匝间短路复合序网

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma(2)} &= [\alpha^2(X_2 - RX_\sigma) + \alpha \cdot RX_\sigma] \times 2, \\
 X_{\beta(2)} &= 2X_2 - X_{\sigma(2)}, \quad X_{r(2)} = 2X_2; \\
 X_{\sigma(0)} &= \alpha X_0 \times 2, \\
 X_{\beta(0)} &= 2X_0 - X_{\sigma(0)}, \quad X_{r(0)} = 2X_0.
 \end{aligned}$$

上列电抗参数均为常用的数据, 所以十分方便, 利用这些参数和图 5 的实用计算法的计算结果如表 1。已知

$$X''_d = 0.1963, \quad X_\sigma = 0.1713, \quad X_2 = 0.24, \quad X_0 = 0.111 \quad \text{且取} \quad R = 0.6$$

发电机孤立运行,  $X_c = \infty$

表 1 内部短路的实用计算结果

$\alpha$	0.05	0.10	0.143	0.20	0.30	0.50	0.6426	0.80	1.0
$X_{\sigma(1)}$	0.01075	0.0224	0.0332	0.0486	0.0785	0.150	0.2082	0.2842	0.3926
$X_{\sigma(2)}$	0.011	0.0233	0.0350	0.0521	0.0864	0.1714	0.244	0.340	0.480
$X_{\sigma(0)}$	0.0111	0.0222	0.0317	0.0444	0.0666	0.111	0.142	0.1776	0.222
$X'_{\beta(1)}$	0.7746	0.7626	0.752	0.7366	0.7066	0.6352	0.5770	0.501	0.3926
$X'_{\beta(2)}$	0.949	0.9367	0.925	0.908	0.8736	0.7896	0.715	0.620	0.480
$X'_{\beta(0)}$	0.433	0.422	0.412	0.40	0.3774	0.333	0.302	0.266	0.222
$X_{1z}$	0.0106	0.02176	0.0318	0.0456	0.0707	0.1213	0.153	0.1813	0.1963
$X_{2z}$	0.0109	0.0227	0.0337	0.0493	0.0786	0.141	0.182	0.220	0.240
$X_{0z}$	0.0108	0.021	0.0294	0.04	0.0566	0.0833	0.0966	0.1065	0.111
$I_K^{(1)}$	1.546	1.527	1.507	1.483	1.457	1.447	1.483	1.577	1.827
$I_K^{(2)}$	2.33	2.249	2.183	2.107	2.009	1.906	1.910	1.994	2.292

注: 表中  $X'_{\beta(i)} = X_{\beta(i)} + X_{r(i)}$

一个分支  $\alpha = 0.143$  匝间短路实用计算与理论计算的偏差为

$$\Delta = \frac{1.507 - 2.288}{2.288} = -34.1\%$$

两个分支间 ( $\alpha_1 = 0.286, \alpha_2 = 0.714, \alpha_3 = 0.0714, \alpha_4 = 0.9286$ ) 匝间短路时实用计算偏差

$$\Delta = \frac{1.483 - 1.963}{1.963} = -24.5\%$$

两相 (一个分支) 短路 ( $\alpha = 0.143$ ) 时, 实用计算偏差

$$\Delta = \frac{2.183 - 2.798}{2.798} = -21.9\%$$

作为继电保护整定校验计算用的发电机内部短路实用计算方法, 上述偏差应该是可以接受的, 因为它的计算结果都是偏小的, 对保护灵敏系数 (或动作死区) 校验是合适的, 何况它比理论计算简易得多。

## 十、计及过渡电阻的发电机内部短路

根据 A. R. Vane Warrington 《Protective Relays》vol II 所提供的数据, 故障电流超过 1000 安时, 电弧压降为每只约 450 伏, 或每米约 1.47 千伏。设发电机内部短路的弧长为 5 厘米, 则电弧压降约为 75 伏, 60 万千瓦发电机的基值阻抗为

$$\frac{20}{\sqrt{3} \times 20,378} = 0.567 \text{ 欧}$$

所以若内部故障电流 (计及电弧电阻影响) 为一个额定电流 (20,378 千安), 则 5 厘米弧长 75 伏压降的弧阻标么值为

$$\frac{75}{20,378 \times 10^3 \times 0.567} = 0.0065$$

计及这个弧阻时,  $\alpha = 0.143$  的一个分支匝间短路零序电流为

$$I_{k(0)}^{(1)} = \frac{0.143}{\sqrt{(0.0318 + 0.0337 + 0.0294)^2 + (3 \times 0.0065)^2}} = 1.476$$

计及弧阻 0.0065 后,  $\alpha = 0.143$  的两相 (一个分支) 短路电流 (正序) 为

$$I_{k(1)}^{(2)} = \frac{0.143}{\sqrt{(0.0318 + 0.0337)^2 + (0.0065)^2}} = 2.173$$

## 十一、大型汽轮发电机内部短路保护定值问题

根据上述计算结果, 考虑实际可能的弧阻影响, 当发生 14.3% 的匝间短路时, 零序电流型横差保护中将有电流

$$3I_{2(0)} = 3I_{k(0)}^{(1)} \frac{X_{\alpha(0)}}{X_{\alpha(0)} + X'_{\beta(0)}} = 0.323$$

可见, 若选用横差保护的电流定值为 0.3, 则不能保证动作死区小于 10%。如果要求保护死区小于 5%, 则更需降低定值, 这时即使不计弧阻作用, 横差保护定值也应小于下值:

$$3I_{2(0)} = 3 \times 1.546 \frac{0.0111}{0.0111 + 0.433} = 0.116$$

即定值约 0.1 时能有死区小于 5%。当然必须相应提高保护装置的三次谐波滤过比, 有时还应考虑外部短路暂态过程中不平衡零序电流可能引起横差保护的误动问题。

如采用零序电压型横差保护, 则在  $\alpha = 0.143$  的同样情况下, 保护装置将有电压为

$$U_{(0)} = I_{k(0)}^{(1)} \times \sqrt{X_{0\Sigma}^2 + (0.0065)^2} = 0.0444$$

如果同样要求死区不大于 5%, 则零序电压定值应小于

$$U_{(0)} = 1.546 \times 0.0108 = 0.0167$$

此时也应加强保护装置的三次谐波阻波, 且应有负序功率方向继电器作为外部短路的闭锁元件。

在  $\alpha = 0.143$  的两相（一支）短路时，计及弧阻作用，纵差保护中将流过电流  $\sqrt{3} \times I_{i(1)} = 3.76$ ，保护将非常灵敏地动作。如果要求死区小于 5%，则纵差保护最小动作电流不应大于

$$\sqrt{3} \times \frac{0.05}{\sqrt{(0.0106 + 0.0109)^2 + (0.0065)^2}} = 3.85$$

可见发电机纵差保护是很容易满足死区小于 5% 的要求的。但是不能由此导出结论认为纵差保护定值完全可以大于额定电流，因为发电机纵差保护的电流互感器工作条件比变压器或母线的差动保护好，一般不必对外部短路的暂态不平衡电流过分顾虑，而且电弧电阻的存在，使发电机邻近中性点的相间短路电流趋向于零，因此大型发电机的纵差保护定值电流取为 0.2~0.3 是有可能的，也是有利的；至于中小型发电机纵差保护定值不妨取 1.2~1.3 倍额定电流。