

大型发电机组的转子两点接地保护装置

许昌继电器研究所 沈学斌

本文分析了由于发电机组容量增加,励磁电压提高以后,目前生产的转子两点接地装置的不足,从而提出灵敏地两点接地装置。文章着重介绍了该装置实现原理、主要特点,并分析了在不同励磁电压,不同地方发生转子两点接地故障时,保护装置的死区的大小,为保护装置整定计算提供依据。

一、前言

近几年来,电力工业飞速发展,大中型容量的发电机组广泛地投入电力系统运行,从前几年投入系统的10万千瓦到30万千瓦机组来看,普遍反映一个问题,即由于单机容量增大,发电机励磁电压提高,20万千瓦~30万千瓦发电机组励磁电压大约为450伏~490伏左右。而目前各制造厂家生产的电磁型转子两点接地保护装置DD—2,由于灵敏度低,死区大约可达到40~50%左右,同时继电器动作电流为70mA,为了保证提供这样大一个电流,因此调节平衡电阻值不能取得太大,在高的励磁电压下,无疑功率消耗很大,使之无法投入进去。因此对于大容量的发电机组,如何设计出一种合适的转子两点接地保护装置,是急待解决的一个问题。

国内外许多科研单位,高等院校在这方面进行许多研究工作,苏联曾利用转子两点接地后,在定子回路出现二次谐波分量来构成转子两点接地保护,国内清华大学与许继所合作也研究出来这类型的产品,在电力系统试运行;我国成套进口的苏联20万千瓦抗组还是采用电桥原理构成的转子两点接地保护,但其灵敏度有了很大程度提高,使死区范围缩小。为了满足大型机组保护的要求,完成全套整流型机组保护的品种,我们研制了新型转子两点接地保护装置,其灵敏度高,死区小,能满足10万千瓦~30万千瓦机组使用的要求。

二、转子两点接地对发电机组的危害

对于隐极式汽轮发电机,由于磁场分布均匀,当转子回路发生一点接地故障,对于发电机组影响不大,仍能够继续运行,但是对于凸极式水轮发电机,磁场分布不均匀,转子与定子之间气隙大,当转子一点接地后,如果再发生第二点接地,由于磁场的不对

称, 将产生很大的横向推力, 产生很大的振动和变形, 导致机组损坏, 因此对于凸极式水轮发电机不允许转子回路带一点接地运行。

然而, 无论是汽轮发电机还是水轮发电机, 当发电机转子回路发生两点接地故障, 将可能产生下列恶果:

1. 由于一部分转子线圈被短接, 使转子回路出现一部分线圈中流过的电流增加, 造成气隙磁通的不平衡, 引起发电机剧烈振动, 有可能使发电机遭受严重的损坏。
2. 由于第二个接地点的出现, 短接部分绕组, 可能引起局部发热, 使转子缓慢变形而偏心, 其结果同样会引起发电机振动和损坏。
3. 可能使转子绕组和转子本体烧坏, 还将有可能使汽机磁化。
4. 由于转子是一个高速旋转的组件, 转子线圈受到强大的离心力, 当转子绕组发生两点接地时, 由于离心力和电动力的作用, 造成发电机转子本体产生机械变形等方面的损坏。

总之, 当转子回路出现两点接地后, 其后果是十分严重的, 因此对于汽轮发电机组均装设两点接地保护装置, 它经一定的延时后跳闸, 切除发电机。

三、ZD—9型转子两点接地保护装置的原理

ZD—9型转子两点接地保护装置, 采用电桥平衡原理实现的。它由平衡电阻 R_1 、 R_2 , 极化继电器 $1JH$ 、 $2JH$, 时间继电器 SJ , 出口中间继电器 ZJ , 扼流线圈 L , 隔直电容器 C_1 , 滤波电容 C_2 , 不平衡电压指示表 V 及信号指示灯 HD 组成。

当发生一点接地后, 马上投入平衡电阻 R_1 、 R_2 , 通过调整 R_1 或 R_2 , 使电桥达到平衡, 然后通过装置上的不平衡电压表可以看到电压为零。当转子回路 P 点发生第二点接地故障, 电桥平衡遭受破坏, 因此有电流 I_f 流过继电器线圈, 当电流 I_f 大于极化继电器动作电流 $I_{f.dz}$ 时, $1JH$ 或 $2JH$ 动作, 其触点 $1JH_1$ 或 $2JH_1$ 闭合起动时间继电器 SJ , 经一定的整定延时后, SJ_1 闭合, 起动出口中间继电器 ZJ , ZJ 动作后通过自己的触点 ZJ_2 进行自保持, 同时触点 ZJ_1 断开, 投入隔直电容器 C_1 , 此时 $1JH$ 、 $2JH$ 因失电返回, 同时, 时间继电器也失电复归; ZJ_3 触点闭合起动信号指示灯 HD , 表示发生两点接地故障, 装置已启动。 ZJ_4 、 ZJ_5 触点送给光字牌和发出掉闸脉冲。事故处理完毕, 按复归按钮 AN , 整套保护装置复归。其原理图见图1。

该保护装置极化继电器动作电流 $I_{f.dz} = 0.55mA$, 因此该保护装置灵敏度很高, 故平衡电阻 R_1 、 R_2 阻值可以选择很大, 本装置 $R_1 = R_2 = 3K\Omega$; 由于 R_1 、 R_2 阻值很大, 即算励磁电压很高时(本装置设计励磁电压150伏~500伏), 其功率消耗仅仅为20瓦, 这样就适合于大型发电机组上使用。

其次, 该保护装置在操作回路设计时, 使极化继电器线圈和时间继电器线圈是短时带电。当接地发生后, 极化继电器动作起动时间, 时间动作起动出口中间继电器, 出口中间继电器动作后, 就使极化继电器由于隔直电容器的投入而退出运行, 时间也随即返回, 这样就允许较灵敏的极化继电器使用在较高的励磁电压回路中, 而可以不考虑它的

热稳定性。

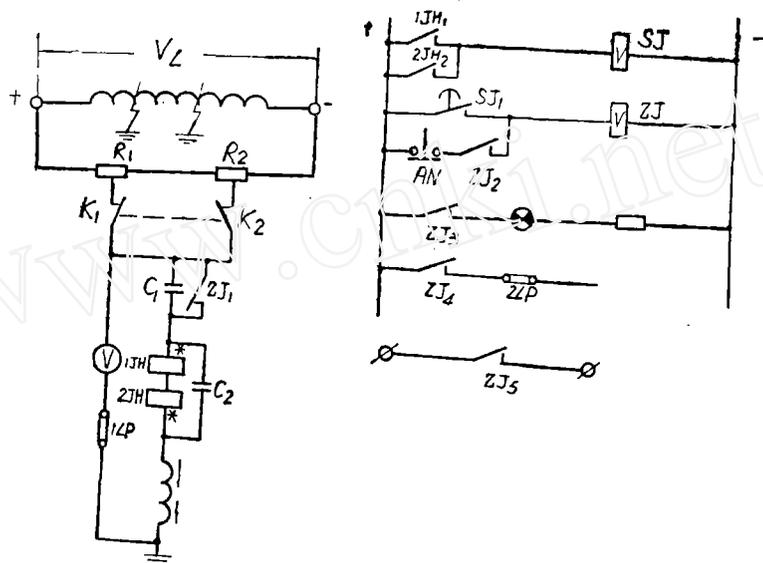


图 1 两点接地保护原理图

为了躲过发电机励磁回路交流电流的影响，在发电机两点接地装置中，设置具有很高的交流阻抗的扼制圈，当频率 $f = 50$ 赫芝时，其交流阻抗为 $70 K \Omega$ 以上，而直流电阻小于 160Ω ，能起到完全阻塞励磁回路中的交流成分。目前，在发电机中，转子绕组一般采用下列几种励磁方式：

a. 直流励磁机励磁系统：图 2 所示，这种励磁方式一般使用 10 万千瓦及以下机组，其谐波电压主要由于整流子及炭刷在运行中打火引起的高频电压，其数值不高，频率在几千赫芝以上。

b. 它励式二极管或可控硅励磁系统：图 3 所示，其转子电流为交流励磁机 JL 整流后的输出电流，因此当主励磁机频率为 100 赫芝时，在转子电流中含有 6 次谐波分量，这种励磁方式常用 10 万千瓦和 20 万千瓦机组中，上海电机厂生产的 30 万千瓦机组也采用这种励磁方式。

c. 自励式半导体励磁系统：图 4 所示，这种励磁方式由电流互感器 $C.T$ 供给二极管整流桥和由整流变压器 $T.T$ 供给可控硅 SCR 整流桥。因此发电机转子电流中，交流成分有 3 次谐波、6 次谐波分量。

不论任何一种励磁方式，在发电机励磁回路中均存在 3 次、6 次或更高次谐波分量，当极化继电器动作值十分灵敏的情况下，这些谐波分量如果不完全阻塞，将导致极化继电器触点抖动，影响它可靠工作，为此设置交流阻抗非常高的扼流线圈，就能完成这一功能。而老产品 $DD-2$ 扼流线圈阻抗仅只有 $5 K \Omega$ ，它是无法在 $ZD-9$ 装置中使用的。

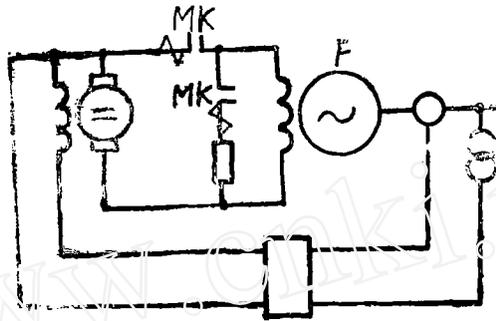


图2 直流励磁机系统

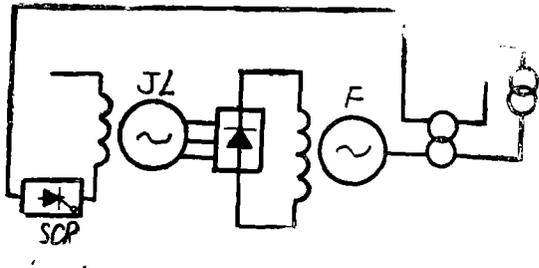


图3 它励式二极管整流励磁系统

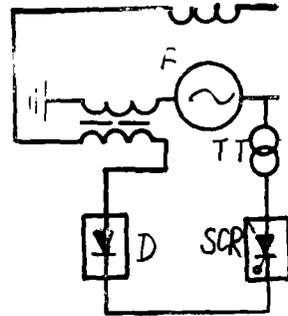


图4 自励式半导体励磁系统

四、保护装置的灵敏度分析

从图5的等值电路可以看出，假设发电机励磁绕组A点发生第一点接地故障，设A点距正电源的电阻为 R_m ，那么A点距离负电源电阻为 $R - R_m$ ，通过调整滑动电阻 R_1 、 R_2 ，使电桥趋近平衡，此时A点和B点的电位差为零，即 $\varphi_A - \varphi_B = 0$ ，故流过极化继电器回路的电流 $I_j = 0$ 。假定在励磁绕组P点又发生第二点接地，且P点接近励磁电源正极，假设P点到A点之间被短接的电阻为 R_n ，由于电桥平衡被破坏，此时在极化继电器回路中有电流 I_j ，这个电流多少，可以通过计算获得。

设一点接地调平衡后，A点电位： $\varphi_A = \frac{V_L}{R} \cdot R_m$

B点电位： $\varphi_B = \frac{V_L}{R_1 + R_2} \cdot R_1$

$\therefore \varphi_A = \varphi_B$

即 $\frac{V_L}{R} \cdot R_m = \frac{V_L R_1}{R_1 + R_2}$ (1)

式中 R —整个励磁绕组的直流电阻。

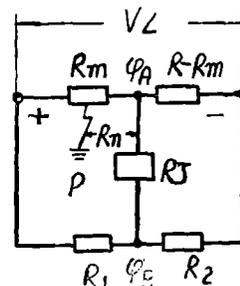


图5 两点接地等值电路

当P点发生第二点接地后，A点电位为：

$$\varphi'_A = \frac{V_L}{R - Rn} (R_m - R_n) \quad \dots\dots\dots(2)$$

而B点电位仍然保持不变，因此 $\varphi'_A \neq \varphi_B$ ，故有电流流过极化继电器，此电流为：

$$I_J = \frac{\varphi'_A - \varphi_B}{R_J + r_o} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中： R_J —极化继电器线圈电阻和扼流圈直流电阻之和，ZD—9产品中 $R_J = 2900\Omega$ 。

r_o —电源内阻，它根据图6，解二端网络可以求得：

$$r_o = \frac{(m-n)(1-m)R}{(1-n)} + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中： $m = \frac{R_m}{R} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ ——励磁绕组正电源端第一个接地点的阻抗对整个励磁绕组的阻抗比。

$n = \frac{R_n}{R}$ ——短路匝数的阻抗对整个励磁绕组阻抗之比。

比。

$R_1 + R_2$ ——可调平衡电阻， $R_1 + R_2 = 6K\Omega$

又 $\because R_1 = m(R_1 + R_2)$ ， $R_2 = (1-m)(R_1 + R_2)$ ，

故(4)式可写成：

$$r_o = \frac{(1-m)(m-n)}{(1-n)} R + (1-m)m(R_1 + R_2)$$

忽略励磁回路等效电阻R，因此获得：

$$r_o \approx (1-m)m(R_1 + R_2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

这样流过极化继电器的电流为：

$$I_J = \frac{V_L \cdot m}{R'_J + r_o} - \frac{V_L(m-n)}{(1-n)(R_J + r_o)} = \frac{V_L n(1-m)}{(1-n)(R_J + r_o)}$$

代入(5)式 r_o 值得：

$$I_J = \frac{V_L n(1-m)}{(1-n) [R_J + (1-m)m(R_1 + R_2)]} \quad \dots\dots\dots(6)$$

同理，如果第二点接地靠近电源的负极，被短接的绕组 R_n ，故流过极化继电器中的电流为：

$$I_J = \frac{V_L n m}{(1-n) [R_J + (1-m)m(R_1 + R_2)]} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中： V_L ——励磁电压，ZD—9产品设计 $V_L = 150 - 500$ 伏，

根据(6)和(7)式，可以计算出两点接地时，装置的死区大小，其值为：

$$n_1 = \frac{I_J [R_J + m(1-m)(R_1 + R_2)]}{I_J [R_J + m(1-m)(R_1 + R_2)] + V_L(1-m)} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$n_2 = \frac{I_J [R_J + m(1-m)(R_1 + R_2)]}{I_J [R_J + m(1-m)(R_1 + R_2)] + V_L m} \quad \dots\dots\dots(9)$$

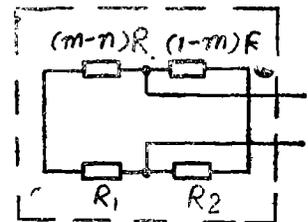


图6 二端网络等值图

式(8)是当第二点接地靠近励磁绕组正极侧, 计算死区为 n_1 ; 式(9)是当第二点接地靠近励磁绕组负极侧, 计算死区为 n_2 。

下面我们具体讨论一下, 在不同的接地故障时, ZD—9型转子两点接地装置的灵敏度。

1. 当励磁电压 $V_L = 500$ 伏, 在转子绕组中部发生一点接地故障时, 即此时 $m = 0.5$:

$$n_1 = n_2 = \frac{0.55 \times 10^{-3} \cdot [2900 + 0.5(1-0.5) \times 6000]}{0.55 \times 10^{-3} \cdot [2900 + 0.5(1-0.5) \times 6000] + 500(1-0.5)}$$

$$= \frac{2.42}{2.42 + 250} = 0.96\%$$

从计算可知, 在这种情况下, 装置的死区小于1%。

2. 当励磁电压 $V_L = 150$ 伏, 在转子绕组中部发生一点接地故障, 即 $m = 0.5$, 此时死区:

$$n_1 = n_2 = \frac{2.42}{2.42 + 75} = 3.1\%$$

3. 在励磁电压 $V_L = 500$ 伏, 当靠近励磁绕组正极10%处发生一点接地故障, 即 $m = 0.1$, 其死区为:

$$n_1 = \frac{0.55 \times 10^{-3} [2900 + 0.1(1-0.1) \times 6000]}{0.55 \times 10^{-3} [2900 + 0.1(1-0.1) \times 6000] + 500(1-0.1)}$$

$$= \frac{1.892}{1.892 + 450} = 0.41\%$$

$$n_2 = \frac{1.892}{1.892 + 50} = 3.6\%$$

4. 在励磁电压 $V_L = 150$ 伏, 当靠近励磁绕组正极10%处发生一点接地故障, 即 $m = 0.1$, 其死区为:

$$n_1 = \frac{1.892}{1.892 + 135} = 1.4\%$$

$$n_2 = \frac{1.892}{1.892 + 15} = 11.2\%$$

5. 当励磁电压 $V_L = 500$ 伏, 在转子绕组靠近正极90%处发生接地故障时, 即 $m = 0.9$, 其死区为:

$$n_1 = \frac{1.892}{1.892 + 50} = 3.6\%$$

$$n_2 = \frac{1.892}{1.892 + 450} = 0.41\%$$

6. 当励磁电压 $V_L = 150$ 伏, 在转子绕组靠近正极90%处发生接地故障时, 即 $m = 0.9$, 其死区为:

$$n_1 = \frac{1.892}{1.892 + 15} = 11.2\%$$

$$n_2 = \frac{1.892}{1.892 + 135} = 1.4\%$$

7. 当第一点接地发生励磁绕组的正极上或负极上时, 即 $m = 1$ 或 $m = 0$, 其死区为:

$$n_1 = n_2 = \frac{I_f \cdot R_f}{I_f \cdot R_f} = 100\% \quad \dots\dots\dots(10)$$

从(10)可以看出, 当 $m = 1$ 或 $m = 0$ 时, 保护的死区为100%, 这就是采用电桥原理实现的两点接地保护装置的一种缺陷, 为了补救这一缺陷, 采用一定的措施是能够弥补它的不足, 图7所画的等值电路就是这样一种措施, 即发现通过调整平衡电阻 R_1 、 R_2 后, 无法调整使电桥达到平衡, 这时可打开连接片 $1LP$, 或 $2LP$, 人为的投入一个电阻, 这样就可以使之调整平衡, 当发生第二点接地后, 接地保护装置就能可靠地动作, 实现了无论在正极或负极处出现接地故障, 也能够正确动作。平衡电阻 R_f 的阻值, 一般选取为 $0.2R$ 值较为合适, R_f 值太大, 影响励磁电压, 同时 R_f 功耗较大, 发热等方面较困难; R_f 值太小, 对保护的灵敏度有所降低。

通过上述分析计算可以清楚的知道, 对于10万千瓦以上的大型发电机, 它的励磁电压 $V_L = 400 \sim 500$ 伏左右, 因此无论接地点发生在 $m = 0.5$, $m = 0.1$, $m = 0.9$ 等几种不同地方, 保护装置的灵敏度是十分高, 其死区在最不利的情况为3.6%, 均小于5%, 而最有利情况死区仅为0.41%, 这是电磁型两点接地装置无可比拟的, 它能完全满足大型机组要求; 而对于小型机组, 虽然励磁电压稍微低一些, 但它的死区在最不利的情况也仅仅只有11.2%, 完全能满足使用上的要求。

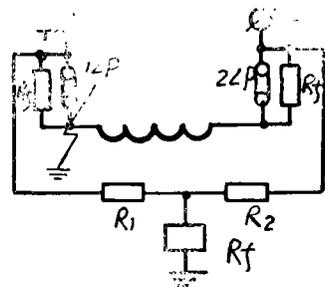


图7 正极或负极接地时, 接线图

五、结 论

通过模拟试验和分析计算表明, 新研制出来ZD—9型转子两点接地保护装置, 具有下列几点特点, 它能完全满足10~30万千瓦发电机组的要求, 能替代目前生产的DD—2型电磁型两点接地保护装置。

1. 装置具有较高的灵敏度, 死区小, 当励磁电压 $V_L = 500$ 伏时, 最大死区为3.6%, 装置的最小直流动作电压小于3.5伏, 能做到当发电机励磁绕组短路匝数为整个匝数的5%时, 保护能正确地反应。

2. 装置能适应较宽广的励磁电压范围, 当励磁电压为500伏时, 投入的平衡电阻的功率消耗仅仅只有20瓦左右, 使平衡可调电阻能装设在装置内, 构成一个整体, 调整试验起来十分方便。

3. 装置中设置了具有较高的交流阻抗的扼流线圈, 其50赫芝交流阻抗为70KΩ以上, 远远大于DD—2型两点接地保护装置扼流圈阻抗5KΩ值, 因此它能基本上阻塞励磁绕组中交流成分进入极化继电器工作回路, 提高了装置的工作可靠性。

4. 装置在操作回路设计考虑,当转子两点接地保护装置动作后,使极化继电器工作回路,通过隔直电容器 C_1 作用,使之退出运行,不长期承受高的直流电压作用;同时时间继电器也不长期带电,降低直流回路功率消耗,这样提高装置的可靠性。

主要参考资料

1. 大容量发电机组整流式成套保护装置 内蒙古电力勘测设计院
2. $K3P2-Y4$ 和 $K3P2-T4$ 型继电器组(俄文)
3. 大型机组晶体管继电保护(上) 许昌继电器研究所 清华大学电力系

通 知

为了促进生产,方便用户,更好地为实现四个现代化服务。我所已出版产品样本——《^{高压}超高压线路保护》共计13分册。(详见目录)。需要者请来函办理函购手续

《^{高压}超高压线路保护》分册目录如下:

1. $PXH-12A$ 相差动高频保护屏,包括 $ZCG-12$ 相差动高频保护装置简称 $ZCG-12$; $SF-5B$ 收发讯机简称 $SF-5B$ 。
2. $PXH-12B$ 相差动高频保护屏包括 $ZCG-1A$ 相差动高频保护装置简称 $ZCG-1A$; $SF-5B$ 。
3. $PXH-13A$ 距离零序综合重合闸屏包括 $LH-15A$ 距离保护装置简称 $LH-15A$; $ZLL-2$ 三段零序方向电流速断保护装置简称 $ZLL-2$; $ZZC-4$ 综合重合闸装置简称 $ZZC-4$; $ZFZ-1$ 分相开关辅助操作装置简称 $ZFZ-1$ 。
4. $PXH-14A$ 相差动高频综合重合闸屏包括 $ZCG-12$; $SF-5B$; $ZZC-4$; $ZEZ-1$ 。
5. $PXH-14H$ 相差动高频综合重合闸屏包括 $ZCG-1A$; $SF-5B$; $ZZC-4$; $ZFZ-1$ 。
6. $PXH-15A$ 距离零序保护屏,包括 $LH-15A$; $ZLL-2$ 。
7. $PXH-16A$ 零序综合重合闸屏包括 $ZLL-2$; $ZZC-4$; $ZFZ-1$ 。
8. $PXH-17A$ 相差动高频距离保护屏,包括 $ZCG-12$; $SF-5B$; $LH-15A$ 。
9. $PXH-17H$ 相差动高频距离保护屏包括 $ZCG-1A$; $SF-5B$; $LH-15A$ 。
10. $PXH-23A$ 高频闭锁距离保护屏包括 $LH-15A$; $SF-5B$ 。
11. $PXH-25A$ 高频闭锁距离零序保护屏包括 $LH-15A$; $ZLL-2$; $SF-5B$ 。
12. $PXH-43A$ 距离零序重合闸屏包括 $LH-15$; $ZLL-2$ 。
13. $PXH-02$ 小电流接地距离保护屏。

编委会