

水轮发电机高灵敏横差保护的试验研究

西北勘测设计院
许昌继电器研究所
清华大学电机系

李振华、李岩、田又涵(执笔)
罗昌民
王文志、王维俭

内容提要

通过凸极发电机内部匝间、相间不对称短路、外部相间短路试验,石泉水电厂现场测试分析,提出减少横差保护用CT变比,提高三次谐波滤过比、降低横差保护定值,可以在保证外部故障可靠不误动的前提下,使单元件式横差保护成为水轮发电机所有内部故障(相间、匝间短路,定子开焊)的最简单灵敏的一种主保护。文中还具体介绍了一台水轮发电机装设高灵敏的BL-56型横差保护的实例。

一、发电机横差保护不平衡电流的测试

自1983年以来,我们多次在石泉和富春江等电厂测试发电机横差保护不平衡电流。今以石泉电厂数据为例

1. 基本参数:

(1) 发电机TS-900/135-56型

$S_e = 53000 \text{ kVA}$ $U_e = 10.5 \text{ kV}$ $I_e = 2920 \text{ A}$ $\cos\varphi_e = 0.85$ $X_d'' = 0.1834$

$X_d' = 0.1898$ $X_2 = 0.1865$ $X_0 = 0.0847$ $2\rho = 56$

(2) 原有单元件横差保护装置:

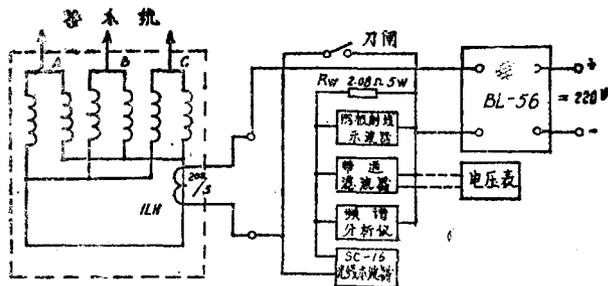
电流互感器: LDCD-1000/5A 继电器: BL-2A 三次谐波滤过比 > 10
动作定值 $I_{dz} = 4 \text{ A}$ $t = 0''$

2. 不平衡电流的测量:

测量线路和仪器见图一。采用的BL-56横差保护具有高的三次谐波滤过比(大于50)

(1) 频谱分析仪测量:

用磁带记录仪对发电机横差不平衡电流录波后,由专用程序进行频谱分析。图二是发电机处于三相短路状态下,定子电流为1060A时,不平衡电流的波形,它在每一周期(20ms)



图一

中，略有变化。由于不平衡电流并非完全的稳态周期性波形，故采用傅氏积分的连续频谱分析。由所得幅频特性〔图三（1）（2）（3）〕可以看出：

1° 发电机短路试验时，不平衡电流中主要是三次谐波。设 $K_b = \frac{I_1}{I_3}$

$$K_{bmax} = 0.279, \quad K_{bmin} = 0.1649.$$

2° 发电机负荷状态，不平衡电流中各次谐波大小随负荷电流变化。负荷电流较小时， I_1 略大于 I_3 ；负荷电流较大时， I_3 大于 I_1 。例如，当负荷电流为 3000A 时， $K_b = \frac{6.044}{9.591} = 0.630$ 。试验中还发现，负荷电流较小时，机组振动加剧，使气隙发生不均匀变化，引起不平衡电流增大。可见机组振动是产生横差保护不平衡电流的一个因素。

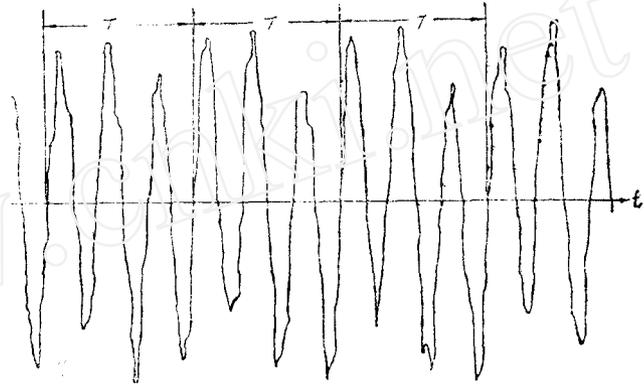


图 二

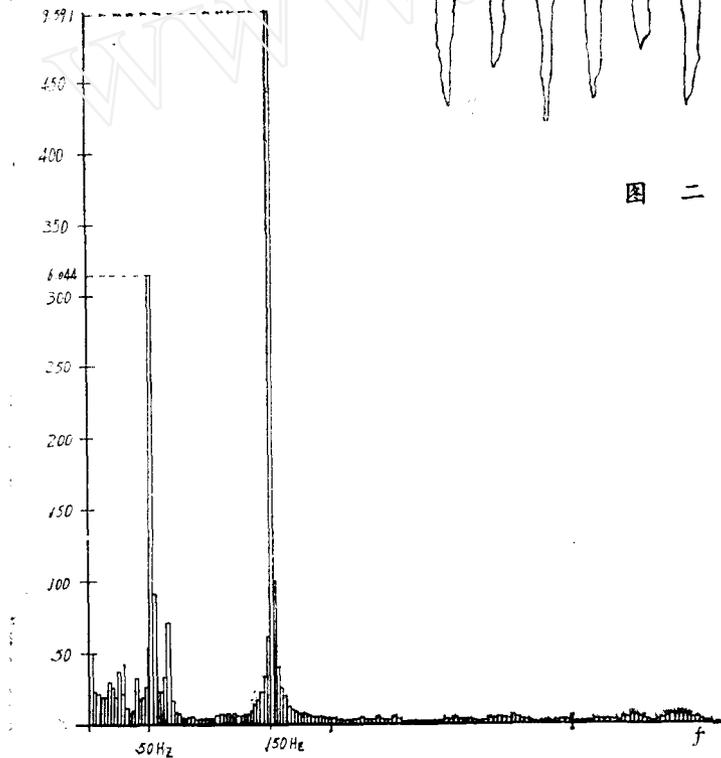
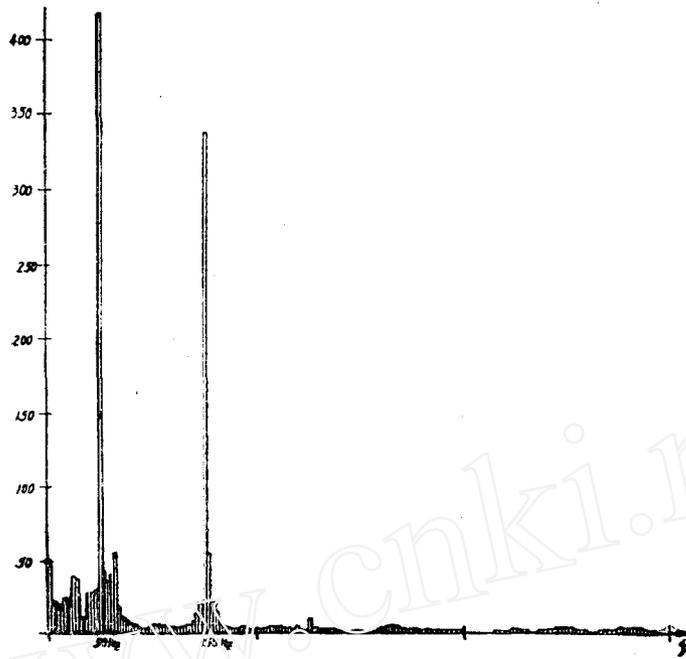
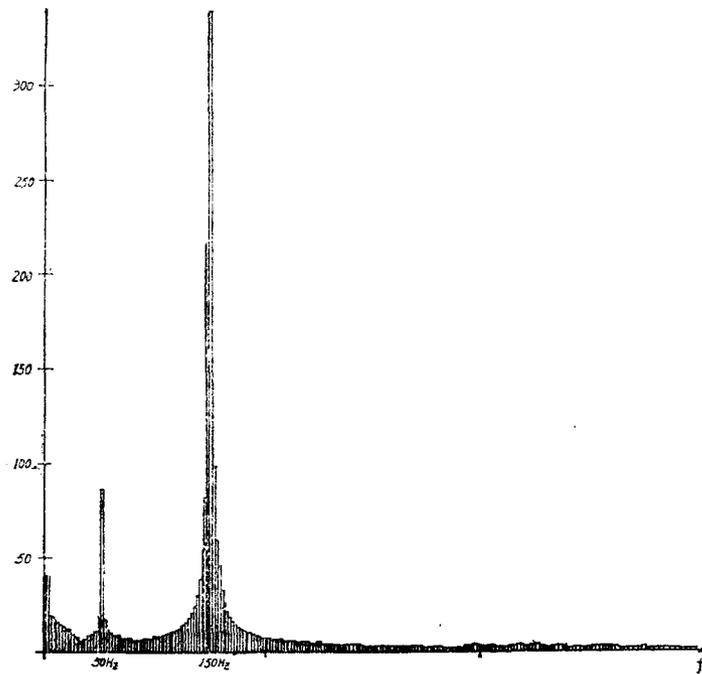


图 三（3）

$P = 50\text{MW}$ ， $Q = 17.5\text{MVAR}$ ， $I_D = 3000\text{A}$ 时横差不平衡电流的幅频特性



图三(2) 发电机并网, $P=0$, $Q=0$ 时横差不平衡电流幅频特性



图三(1) 机端三相短路 $I_D=1060A$ 时横差不平衡电流的幅频特性

3^o 频谱密集于基波与三次谐波的狭窄频区，其它频带很少，因此继电器可用窄带滤波器滤去三次谐波。

(2) 带通滤波器测量：

用50、150、250Hz带通滤波器在不同负荷（或短路电流）下，测得 $I_{b,3}$ 中的基波，三次谐波，五次谐波分量，见表一，表二。

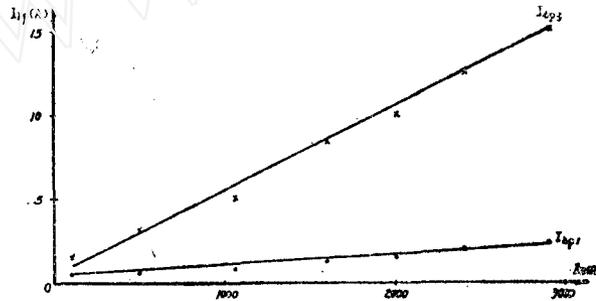
由表一表二可见，不平衡电流中五次谐波分量很小，可以不予考虑。图四图五表示发电机在短路及负荷状态下的 $I_{b,3}$ 中，基波、三次谐波随发电机定子电流变化的曲线。

(3) SC—16示波器测量：

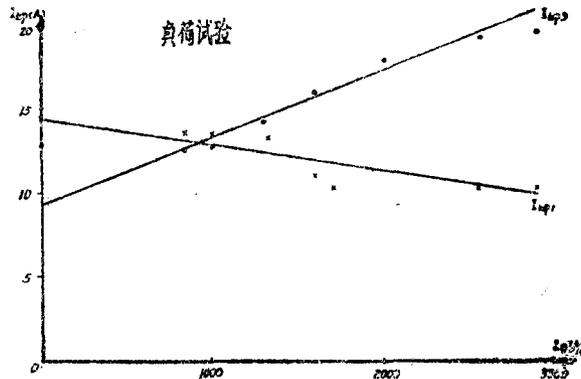
用SC—16示波器记录 $I_{b,3}$ 波形后，每周波20ms采样24点，用傅氏级数谐波分析程序对所录的 $I_{b,3}$ 波形进行分析，可得各次谐波的大小。图六为发电机短路状态下，定子电流 $I_D = 2900A$ 时的横差不平衡电流波形，谐波分析的结果如表三所示。

表一 发电机短路试验时，横差不平衡电流

试验顺序编号	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	
发电机定子电流 $I_D(A)$	100	500	1060	1600	2000	2400	2900	
发电机横差	$I_{b,p,1}$	0.5	0.55	0.846	1.346	1.648	2.019	2.385
	$I_{b,r,3}$	1.462	3.177	5.115	8.462	10.576	12.865	15.327
不平衡电流 $I_{b,3}(A)$	$I_{b,p,1}$	0.260	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192	0.226



图四



图五

表二 发电机负荷试验时，横差不平衡电流

试验顺序编号	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	
发电机有功负荷(MW)	0	2.5	5	12.5	20	25	30	37.5	45	50	
发电机无功负荷(MVAR)	0	15	17	21	7	15	7.5	6	12.5	17.5	
发电机定子电流(KA)	0	0.836	0.974	1.344	1.165	1.603	1.700	2.088	2.568	2.913	
发电机横差不平衡电流 I _{bp} (A)	I _{bp1}	14.60	13.85	13.85	13.46	11.35	11.15	10.38	9.62	10.58	10.38
	I _{bp3}	13.08	12.96	12.88	14.42	15.19	16.15	16.92	18.08	19.42	19.81
	I _{bp5}	0.25	0.33	0.27	0.25	0.27	0.25	0.17	0.15	0.19	0.21

注：1. 不平衡电流指一次值

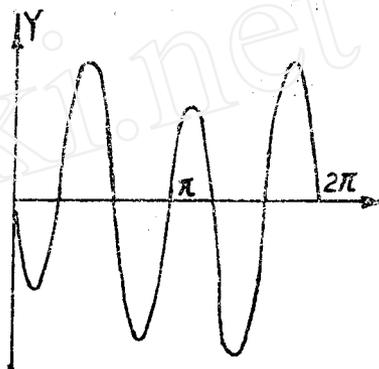
2. 测量各次谐波用同一电压表，因五次谐波很小，读数接近零，故五次谐波测量中误差可能较大。

表中谐波电流指一次值

对三种方法取得的结果进行分析对比所见
1°用三种测试方法所得到的发电机在短路状态及负荷状态下，不平衡电流的频谱分布规律是一致的，基波分量、三次谐波分量随短路（负荷）电流的变化规律也相同，这说明试验方法及试验结果是可靠的。

2°在发电机短路状态下，I_{bp1}、I_{bp3} 近似随短路电流线性增大。

3°在发电机负荷状态下I_{bp1}随负荷电流增大而减小，I_{bp3}随负荷电流增大而增大。水轮发电机横差保护三次谐波电流随定子电流的增大而增大的特性，要求单元件横差继电器有较大的三次谐波滤过比，以利于减小保护定值，提高灵敏度。



图六

表三

谐波次	幅值(A)	有效值(A)	谐波次	幅值(A)	有效值(A)
1	2.3982	1.6958	7	0.1247	0.08818
2	0.1670	0.1181	8	0.1320	0.09333
3	9.0667	6.4111	9	0.01906	0.01348
4	0.4819	0.3408	10	0.01020	0.007212
5	0.07427	0.05252	11	0.1366	0.09660
6	0.4408	0.3117	12	0.1862	0.1317

二、分析讨论

1. 发电机横差不平衡电流I_{bp}的产生原因：

(1) 由于发电机每对极中三相实际存在的不完全对称，这是产生横差保护基波不平衡电流的主要原因。

(2) 对于水轮发电机，由于结构上的原因气隙磁势成为纯正弦波几乎是不可能的。因为三次谐波磁通的存在，使定子绕组有较大的三次谐波电势和电流。基于三次谐波的零序性质，它必然反映在发电机中性点联结线上，这是发电机横差不平衡电流中三

次谐波产生的主要原因。例如，在短路工况下， $I_{b,p3} \sim I$ 成近似线性关系，这是因为在试验中，采用增大励磁的方法来产生较大的短路电流相应地励磁磁密中三次谐波也增大，因而 $I_{b,p3}$ 增大。

(3) 机组振动是引起横差不平衡电流的另一因素。在试验中，机组振动的加剧明显引起 $I_{b,p}$ 增大，因而，在确定保护定值时，对于引起机组振动的各种可能因素，如机组正常运行中的振动区，不对称短路时负序电流引起的机组振动，励磁回路两点接地等，应予足够的重视，以免引起保护误动。

(4) 横差不平衡电流波形的包络线以低频 f_0/p 振荡变化 ($f_0 = 50\text{Hz}$)。如在630KW六对极每相六分支并联绕组的同步发电机进行的单元件横差保护试验中，其不平衡电流 $I_{b,p}$ 如图七所示，该波形图有如下特征：



图七

1° $I_{b,p}$ 主要是三次谐波，
 $f = 150\text{Hz}$ 。

2° $I_{b,p}$ 包络线以120ms为周期
(相当于8.33Hz)。产生这种现象

的原因是：分布在转子一周上的P对极不可能完全对称，发电机转子与定子绕组也不可能完全同心，因而，当转子旋转一周时，定子绕组的感应电流除了以工频周期作周期性变化外，还必定有 f_0/p 的低频振荡。因而使横差不平衡电流包络线呈低频振荡。

2. 中性点不平衡电流的特点：

(1) 不平衡电流中的主要成份是基波与三次谐波。在短路试验中，三次谐波大于基波，在负荷试验中，当 $I/I_e < 0.3$ ， $I_{b,p1} > I_{b,p3}$ ，当 $I/I_e > 0.3$ 时， $I_{b,p1} < I_{b,p3}$ 即当发电机负荷较高时， $I_{b,p}$ 中的主要成份是三次谐波。为提高横差保护灵敏度，应增大三次谐波滤过比。

(2) 短路试验时的不平衡电流 $I_{b,p1}$ 、 $I_{b,p3}$ 随短路电流的增大而增大，负荷试验时的不平衡电流 $I_{b,p1}$ 随负荷增大而减少， $I_{b,p3}$ 随负荷增大而增大，空载时的 $I_{b,p1}$ 最大。不平衡电流的这一特点，使横差保护的定值可用发电机空载时的 $I_{b,p1}$ 作为整定依据。

(3) 不平衡电流中有明显的分数次谐波，它与发电机的极对数有关，其频率为 f_0/p 。

三、高灵敏横差保护的整定和试运

根据试验资料和分析结果，在石泉电厂将高灵敏横差保护投入试运。

试运保护的整定方法：

不同的发电机，其横差不平衡电流存在着差异，为了能确切地整定其定值，应实测其不平衡电流，使保护既可靠，又有足够的灵敏度。

根据上述分析和试验中BL—56保护装置可靠的动作行为，建议高灵敏横差保护的动作电流按如下原则整定：

1° 按避越发电机外部三相短路时，基波最大不平衡电流整定。

2° 大于负荷状态下的基波最大不平衡电流。

由图四所见, I_{bp1} 随 I_D 作线性变化, 采用工程上实用的线性外推法, 可以方便地求得发电机外部三相短路时的最大不平衡电流 I_{bp1max} , 则

$$I_{dz1} = K_k \cdot K_Z I_{bp1max}$$

式中, K_Z —暂态系数, 取 2

K_k —可靠系数 (包括机组振动使 I_{bp1} 增大的系数) 暂设取为 2, 在试运行中积累经验。

设 I_{sb1max} 为负荷状态下实测最大的基波不平衡电流。

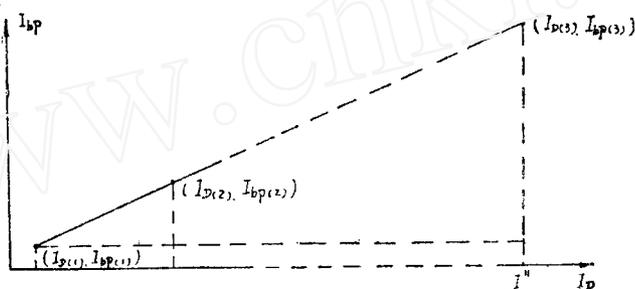
$$I_{dz2} = K_K \cdot I_{sb1max}$$

K_K 为可靠系数, 取 1.5

取 I_{dz1} 和 I_{dz2} 中的大者作为定值, 用外推法计算 I_{bp1max}

作为实例由图四可见

$$I_{D(1)} = 100A, I_{D(2)} = 2900A, I_{bp(1)} = 0.4A, I_{bp(2)} = 2.4A$$



图八

该发电机最大外部短路电流为

$$I'' = \frac{1}{X_d''} \times 2900 = 15812A = I_{D(3)}$$

$$\frac{I_{D(2)} - I_{D(1)}}{I_{D(3)} - I_{D(1)}} = \frac{I_{bp(2)} - I_{bp(1)}}{I_{bp(3)} - I_{bp(1)}}$$

代入以上各已知值, 得

$$I_{bp(3)} = 11.623A = I_{bp1max}$$

$$\text{因而 } I_{dz1} = K_k \cdot K_Z I_{bp1max} = 2 \times 2 \times 11.623 = 46.492 (A)$$

由图五知 $I_{sb1max} = 15A$

$$I_{dz2} = K_K \cdot I_{sb1max} = 1.5 \times 15 = 22.5A$$

所以该保护定值取为 50A (相当于 1.7% I_e) 试运使用 100/5 的 CT, 则二次整定值为 2.5A。石泉*3 发电机原有的单元件横差保护 CT 变比为 1000/5, $I_{dz2} = 4A$, 可见, 按新原则整定的单元件横差保护灵敏度为原来保护的 16 倍。

按上述原则整定的高灵敏的 BL—56 型横差保护曾在工业试验中得到充分证明。试验中, 横差保护的定值取 1% I_e , 在整个试验过程中, 它经受了近 100 次的各种类型的短路故障的考验, 在发电机出口端以外发生各种短路时, 它能正确不误动; 在发电机内

部发生匝间、同相不同分支间、两相和三相不对称突然短路时，它均正确动作。

四 结 论

1.水轮发电机横差不平衡电流中含有很大成份的三次谐波。三次谐波在不平衡电流中的比重，在短路状态比在负荷状态要大。为了实现高灵敏的横差保护，应实测其不平衡电流中各次谐波（主要是一、三次谐波）的大小。

2.横差继电器应有较高的三次谐波滤过比，使能够有效地滤掉不平衡电流中的三次谐波，提高装置的灵敏度。许继厂生产的BL—56横差保护能够满足此要求，并在试验中得到了验证。

3.这种高灵敏横差保护，不仅可以做为发电机匝间短路的主保护，而且对发电机相间短路也有足够的灵敏度。

4.按新定值整定的横差保护装置投入试运，积累运行经验，特别注意在外部故障时和机组振动时的继电器动作行为。

5.高灵敏横差保护的小变比CT，应校核其电动力的稳定性。

参考文献

- [1] 大型机组继电器保护基础 王维俭 侯炳蘊 水电出版社1982年
- [2] 电力系统继电保护原理 天津大学 水电出版社1980年
- [3] 龙羊峡电站发一变组差动保护的试验报告 西北勘测设计院等1982年