

④  
31-34,46

## 水轮发电机采用均匀气隙的尝试

徐光礼 TM312.033

A

**摘要** 本文介绍了SF5000—40/4250水轮发电机在相同气隙以及保证电气性能的前提下,采用了均匀气隙后,通过分析计算和实测结果,证实降低了励磁安匝数,取得了满意结果。对于极靴形状的改变,相应带来电压波形畸变率、电话谐波因数、损耗及效率的变化等问题都采取了相应的措施。

**关键词** 水轮发电机 转子 气隙

## 1 引言

SF5000—40/4250低速凸极同步水轮发电机(以下简称发电机)气隙值的确定,往往是以发电机的电气性能指标和机械制造、安装及运行可靠性综合考虑。一般水电站,对发电机的短路比要求仅仅只需大于或等于1就能满足。而低速发电机由于机械性能方面的要求而确定的最小气隙( $\delta_{\min}$ )值,常常比电气性能要求的值大许多。按机械方面要求的 $\delta_{\min}$ 值(例如4250机座号的电机要求 $\delta_{\min} \geq 5$ ),校核出的短路比大大地大于1。这样虽然可提高发电机的静态稳定性,但励磁安匝数相应增加,转子用铜量也增加,造成成本提高。如何在满足机械方面的要求前提下,使电气性能不能留有过多的裕量,即是本文讨论的内容。

## 2 采用均匀气隙的尝试

通常在发电机的设计中,为了满足电压波形畸变率( $e_v$ )和电话谐波因数(THF)的要求,将磁极的形状制成符合主磁场波形,接近

于正弦波的要求。为此极弧系数一般控制在 $\alpha \approx 0.68 \sim 0.75$ ,而最大气隙与最小气隙比( $\delta_{\max}/\delta_{\min}$ )一般控制在1.5左右。采取以上措施,主磁场的波形很好。

气隙的计算长度为 $\delta' = \delta_{\min} + \frac{1}{3}(\delta_{\max} - \delta_{\min})$ ,若 $\delta_{\max}/\delta_{\min} = 1.5$ 时,则 $\delta' = 1.166\delta_{\min}$ 。从这个结果明显地看出,有16.6%的气隙实际机械尺寸没有被充分利用。

有没有可能既要 $e_v$ 和THF合格,又要让气隙磁动势小的途径,我们在真机上进行了一次尝试,取得了可喜数据。

## 2.1 试验

试验工作是在两台同类型的发电机上进行的。原机型号为SF5000—40/4250,改型机

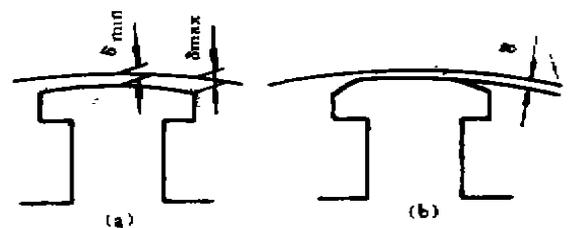


图1 磁极形状示意图

(a)原型机 (b)改型机

型号为SF5500—40/4250。两台机的定、转子冲片,除改型机的极靴表面形状改变外(如图

1所示),其余全部相同。两台机的主要参数及试验数据见表1和表2。

表1 两台机的主要数据及试验结果

项 目	SF5000—40/4250 (原型机)			SF5500—40/4250 (改型机)		
	设计数据	按实物校核数据	实测数据	设计数据	按实物校核数据	实测数据
功率(kW)	5000	4992	4992	5000 <sup>(2)</sup>	5088	5088
功率因数(cosφ)	0.8	0.79	0.79	0.8	0.79	0.79
定子内径D <sub>1</sub> (mm)	3930	3930	3930	3930	3930	3930
定子铁芯长l <sub>1</sub> (mm)	750	750	750	750	750	750
每极每相槽数(q)	2 $\frac{7}{10}$	2 $\frac{7}{10}$	2 $\frac{7}{10}$	2 $\frac{7}{10}$	2 $\frac{7}{10}$	2 $\frac{7}{10}$
气隙δ <sub>min</sub> (mm)	5	4.32 <sup>(2)</sup>	4.32 <sup>(2)</sup>	5	4.9	4.9
气隙比δ <sub>max</sub> /δ <sub>min</sub>	1.625	1.72	1.72	1	1	1
极弧半径R <sub>p</sub> (mm)	906	906	906	1960	1960	1960
磁极线圈匝数(W <sub>2</sub> )	25.5	25.5	25.5	25	25	25
短路比(k <sub>s</sub> ) <sup>(3)</sup>	1.27	1.23		1.14	1.1	
额定励磁电流I <sub>m</sub> (A)	434 (442.7) <sup>(4)</sup>	423 (431.5) <sup>(4)</sup>	415 (424.3) <sup>(4)</sup>	418	424	407.5
电压波形畸变率e <sub>v</sub> (%)	0.99	1.055	1.05 <sup>(5)</sup>	1.42	1.44	1.66 <sup>(6)</sup>
电压谐波因数THF(%)	0.54	0.6	0.723 <sup>(5)</sup> (1.2) <sup>(6)</sup>	0.55	0.56	1.177 <sup>(6)</sup> (1.35) <sup>(6)</sup>

注:(1)为便于比较,改型机的功率按5000kW进行了电磁计算;

(2)该机由于试运行励磁电流偏大,故将气隙垫小;

(3)短路比实测值,因两台机均已投入商业运行,这次试验不便做,而未取得数据;

(4)括号内数据为磁极线圈匝数由25.5匝折算到25匝时的励磁电流便于与改型机进行直接比较;

(5)e<sub>v</sub>及THF的数据为选频表测出各次谐波幅值计算所得(见表2);

(6)括号内数据为杂音计测得。

表2 选频表直接测得的各次谐波的相对幅值

谐波次数(v)	1	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37	41	43	47	49	53	55	59
原型机 (mV)	1000	8.1	1.15	1.4	2.1	5.8	0.9	0.6	0.55	0.54	1.1	0.6	0	0.25	0.25	0.27	0.12	0.03	0.02	0.12
原型机 (mV)	1000	13	1.2	1.8	2.5	8.7	3.6	0.6	1.2	0.68	1.2	0.9	0.72	0.6	0.66	0.3	0.76	0.016	0.64	0.15

## 2.2 试验分析

从表1的数据中可以看见,  $e_v$  的计算值与试验值是相当接近的, 而 THF 误差很大。

THF 值的试验方法, 在国际上对励磁就没有明确的规定。根据美国 IEEE—1983《同步电机试验方法》3.8.1 条规定, “对单台同步发电机, 用无脉动电源代替整流励磁及从电网断开电力变压器的外部条件, 测量电话干扰系数 (THF)”<sup>[1]</sup>。

根据多台在厂内试验测验的发电机, 采用他励电源, 其 THF 的试验值往往比计算值小。因此笔者认为, 这两台机测出的 THF 值偏大, 主要原因是由于试验时采用可控硅励磁方式造成的。励磁电源在整流过程中产生较大脉动, 而发电机转子的电感量又不足以将波滤得很平。另一方面励磁变压器的一次侧, 是直接并联在发电机主引出线的, 使变压器二次侧出现高次谐波, 反过来影响一次侧也出现高次谐波, 这种谐波比电力变压器产生的谐波影响严重得多, 因此该发电机被测出的 THF 数据, 在很大程度上是受励磁变压器的影响。笔者建议, 今后对  $e_v$  和 THF 的试验, 应尽量参照 IEEE115—83 标准进行, 以免外部条件对发电机性能的影响。

## 2.3 结果

从表1中看出, 两台机的  $e_v$  和 THF 值均能满足国家标准的要求, 且均有裕度。

在该电机上, 用均匀气隙代替非均匀气隙进行了测试, 得到了以下满意结果。在保证电气性能不变的前提下, 使励磁安匝数下降 5.6% 左右。如保持原设计的励磁安匝数不变, 转子用铜量不变, 转子温升将下降 10% 左右。

## 3 均匀气隙对电磁性能的影响及对策

### 3.1 $e_v$ 与 THF

以往的设计思想, 是采取各种措施以达

到电压波形尽量完美。笔者认为只要将  $e_v$  及 THF 控制在标准允许范围内, 就能达到限制高次谐波污染供电质量的目的。因标准的本身就是按发电机在系统中的重要性, 即按容量分级, 对  $e_v$  及 THF 提出了不同的要求。

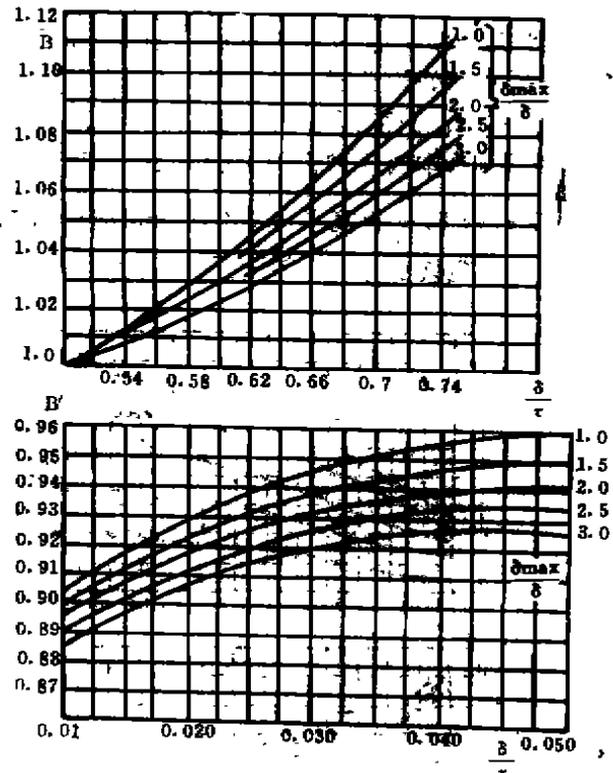


图2 磁场波形系数  $k_e$  的确定  
( $k_e = B \cdot B'$ )

由于采用了均匀气隙, 主磁场的波形变坏, 要达标, 定子绕组必须采用短距、分数槽、减小定子槽宽、合理的阻尼绕组节距等措施来仔细验算。对于低速发电机, 多为分数槽绕组。如被试的两台发电机, 分数槽为  $2\frac{7}{10}$ , 其波形是较容易达标的。有些机组, 如灯泡式水轮发电机, 定子外径受到灯泡比的限制, 极距小, 对定子槽数的选择, 又受到线负荷、定子接线、冲片材料利用率、次谐波振动等多方面的限制。q 值往往在 1~2 之间, 有时无法避

免  $\frac{1}{2}$  及 2 的选用。当采取以上措施无效时，只有将定子槽扭斜，降低高次谐波的绕组系数，达到改善波形的目的。

### 3.2 磁密

在计算气隙、定子齿部、轭部磁密时，用到空载额定电压时的每极磁通  $\Phi = k_0 \cdot \Phi_1 [Z]$  及极靴部分磁通  $\Phi_1 = k_1 \cdot \Phi [Z]$ 。式中系数  $k_0, k_1$  见图 2, 图 3;  $[Z]$  直接受  $\delta_{\max}/\delta_{\min}$  值的影响，本次改型机的试验，气隙磁密  $B_g$ 、齿部磁密  $B_z$   $\frac{1}{3}$  提高了 4.5%，轭部磁密提高了 16%，磁极部分变化不大。

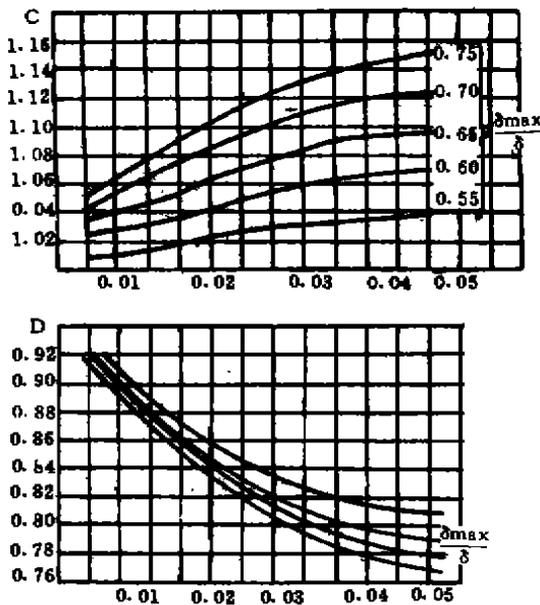


图 3 极弧磁通系数的确定  $k_1 (k_1 = C \cdot D)$

### 3.3 对气隙系数的影响

气隙系数  $k_2 = k_{01} \cdot k_{02} \cdot k_{03}$ ,  $k_2$  值的大小与计算气隙  $\delta'$  的大小有关，采用均匀气隙后  $\delta'$  变小，相应  $k_2$  值变大。这次改型机的试验看出，定子槽宽不变， $k_2$  值较原型机增大 3.5%。 $k_2$  的增大，对磁极表面附加损耗影响较大，在新设计发电机时，可以减槽宽  $b_m$  来补偿。

### 3.4 对发电机效率的影响

由于采用均匀气隙后，主磁场波形受到影响，相应的一些损耗值也随之改变，尤其是附加损耗加大。

#### 3.4.1 励磁损耗

由于总的励磁安匝数下降 5.6%，相应励磁损耗下降 10%，励磁线圈温升下降 10%。

#### 3.4.2 空载额定电压时极靴表面的附加损耗 ( $P_{Fp0}$ )

在发电机主要尺寸无变化时  $P_{Fp0}$  值与  $[(k_{21} - 1) \cdot B_g]^2$  成正比关系，也与磁极冲片的厚度有关。如前所述，改型机的  $k_{21}$  值增大，相应的  $P_{Fp0}$  值增大了 31%，由于绝对值较大，影响效率是相当可观的。如果新设计的发电机，则可以采取减小定子槽宽  $b_m$  及减薄磁极冲片厚度的措施把它降下来。

#### 3.4.3 短路电流为额定电流时，磁场中三次谐波在定子齿中引起的附加损耗 ( $P_{d3}$ )

采用均匀气隙后，主磁场波形中的三次谐波含量明显增加，虽然由于定子绕组用 Y 接，对电压波形虽无影响，但  $P_{d3}$  相应增大了 32%。相对值增加较大，但绝对值不大，不会对发电机效率产生大的影响。

#### 3.4.4 短路电流为额定电流时，定子磁场中齿谐波在极靴表面及阻尼绕组中产生的附加损耗

$P_{d3}$  值的大小与  $\delta_{\max}/\delta_{\min}$  值成反比，与  $P_{Fp0}$  成正比。采用均匀气隙后  $P_{d3}$  值相应为原型机的 2.2 倍。增加的相对值很大，但由于绝对值不大，对效率影响较大。若  $P_{Fp0}$  下降， $P_{d3}$  值也相应下降。

综合以上各种损耗的变化，励磁损耗下降与附加损耗增加相抵消后，改型机的效率下降 0.1%。在各种附加损耗中， $P_{Fp0}$  的绝对值最大，对效率的影响也最大。我们试将改型 (下转第 46 页)

#### 4 结 论

汽轮发电机转子材料(成品),在受不同程度温度影响后各种性能变化不一样,组织变化情况也不一样,一般说来可归纳为如下几点:

(1)当影响温度高于  $A_{C1}$  以上时强度、硬度上升,即塑性、韧性下降。组织中M、B量增多,900℃以上晶粒粗化现象明显,且FATT50%有所升高。而  $A_{C1}$  以下温度影响时,塑性、强度等变化不明显,但总的说来强度略有降低趋势。

(2)转子材料金相组织的变化也随影响温度变化而有所不同。一般说来,  $A_{C1}$  以下温度影响的组织变化不明显。在光学显微镜下不易观察出来,但碳化物颗粒随温度升高而长大的情况仍有所显露(见图4、6)。  $A_{C1}$  以上温度影响缓冷时组织中出现M及部分  $B_{\Sigma}$ 、 $B_{\Gamma}$  组织(随冷却速度降低而增多),原奥氏体

晶界还逐渐出现先共析铁素体析出,此时材料硬化明显。

(3)温度影响后材料抗低周疲劳性能的变化与温度高低及引起材料产生低周疲劳的应变大小有关。一般说来,相变点以下,温度变化引起的材料抗低周疲劳性能变化不太明显。  $A_{C1}$  以上温度则分两种情况:一是较小应变下,材料抗低周疲劳性能均有所提高(见表5),尤其是在900℃左右温度影响后的情况最佳。金属疲劳强度与静强度有关,一般  $\delta_{-1}$  随  $\delta_0$  升高而升高(对钢  $\delta_{-1} \approx 40\% \sim 50\% \delta_0$ ),这个理论与我们的研究结果相符合。另一是在较大应变下材料抗低周疲劳性能则有所下降。

(4)本试验研究来自汽轮发电机运行工况,故得出的结论可供电机运行中或生产中出现意外烧伤事故后材质判断、鉴定时参考,作出判据。

(上接第34页)

机的磁极冲片厚度由1.5mm改为0.65mm(对于低速发电机的磁极强度是不成问题的)进行了校核,改型机的效率反比原型机提高0.05%。若新设计时,将  $b_p/t_p$  变小,则效率可进一步提高。

#### 4 结 论

(1)通过SF5500—40/4250低速凸极水轮发电机采用均匀气隙后,达到降低励磁安匝数的目的。

(2)损耗及效率的变化,只有励磁损耗明显地测出。按精度要求,很难将其他各项附加

损耗测出,有待今后研究。

(3)灯泡式水轮发电机的定子外径受限,散热条件极差,故采用均匀气隙,降低励磁安匝数,定能得到满意结果。

(4)笔者建议在修改《同步电机试验办法》时,要考虑  $e_p$  及 THP 测试方法。

#### 参 考 文 献

- 1 美国电气及电子工程协会 IEEE115—65、IEEE115—83,同步电机试验方法
- 2 电工专业指导性技术文件,电规(DZ)27—63凸极同步电机电磁计算公式
- 3 国家标准 GB1028—80三相同步电机试验方法