

②  
9-13

# 低速凸极同步水轮发电机 采用均匀气隙的尝试

Attempt to Adapt Even Air Gap on Synchronous Hydrogenerator  
with Salient Poles at Low Rotating Speed

徐光礼 TM312.03  
(重庆水轮机厂)

Xu Guangli

(Chongqing Water Turbine Works)

A

## 摘 要

给出了 SF5000-40/4250 低速凸极同步水轮发电机采用均匀气隙的分析计算和实测结果。业已证实,在相同气隙以及保证电气性能的前提下,采用均匀气隙较非均匀气隙能降低励磁安匝。对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及其对策,也进行了讨论。

## Abstract

The analysis calculation and actual measurement results about adapting even air gap on the SF5000-40/4250 type synchronous hydrogenerator with salient poles and low rotating speed are given in this paper. It is verified, that under the premise of same air gap and assured electrical performance the even air gap, compared with uneven one, can decrease field amper-turns. Variation of pole piece configuration leads to change of voltage waveform distortion rate, telephone harmonic factor, loss and efficiency, ect. Above-mentioned effect and appropriate measures are discussed also.

## 关键词 (key words)

低速凸极同步水轮发电机 (synchronous hydrogenerator with salient poles and low rotating speed) 均匀气隙 (even air gap) 影响 (effect)

## 1 前言

凸极同步水轮发电机(以下简称发电机)气隙值的确定,往往是按发电机的电气性能指标和机械制造、安装及运行可靠性来综合考虑的。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,往往比按电气性能要求的值大许

多;按机械方面要求的 $\delta_{min}$ 值,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,但励磁安匝相应增加,转子用铜增加,成本提高。如何在满足机械方面要求的前提下,而电气性能不存在过多的裕度,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:

$$\delta' = \delta_{min} + 1/3 (\delta_{max} - \delta_{min})$$

若  $\delta_{max}/\delta_{min} = 1.5$  时, 则  $\delta' = 1.166\delta_{min}$

从以上结果明显地可以看出, 有16.6%的气隙实际机械尺寸, 没有被充分地利用。

有没有  $e_v$  和 THF 既要合格而气隙磁动势又小的途径呢? 我们在真机上进行了一次尝试, 取得了可喜数据。

(1) 试验工作是在两合同类型的发电机上进行的。其原型机型号为SF5000-40/4250, 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 (见图1) 外, 其余全部相同。两台机的主要数据及试验结果见表1。

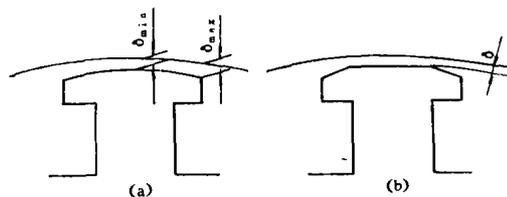


图 1

(a) 原型机磁极形状 (b) 改型机磁极形状

表 1 两台机的主要数据及试验结果

数据类别 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	5000①	5088	5088
功率因数 $\cos\varphi$	0.8	0.79	0.79	0.8	0.79	0.79
定子内径 $D_1$ (mm)	3930	3930	3930	3930	3930	3930
定子铁心长 $l_1$ (mm)	750	750	750	750	750	750
每极每相槽数 $q$	27/10	27/10	27/10	27/10	27/10	27/10
气隙 $\delta_{min}$ (mm)	5	4.32②	4.32②	5	4.9	4.9
气隙比 $\delta_{max}/\delta_{min}$	1.625	1.72	1.72	1	1	1
极弧半径 $R_p$ (mm)	906	906	906	1960	1960	1960
磁极线圈匝数 $w_2$	25.5	25.5	25.5	25	25	25
短路比 $K_s$	1.27	1.23	③	1.14	1.1	③
额定励磁电流 $I_{fN}$ (A)	434 (442.7)④	423 (431.5)④	416 (424.3)④	418	424	407.5
电压波形畸变率 $e_v$ (%)	0.99	1.055	1.05⑤	1.42	1.44	1.66⑤
电话谐波因数 THF (%)	0.54	0.6	0.723⑤ (1.2)⑥	0.55	0.56	1.177⑤ (1.35)⑥

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  $e_v$  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值。

表 2 选频表直接测得的各次谐波的相对幅值

谐波次数 $\nu$	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
改型机 (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) 从表1的数据可以看到, 两台机的 $e_v$ 和THF均能满足国家标准的要求, 且均有裕度。

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

对THF的试验方法, 国标对励磁方式没有明确规定, 而美国IEEE115-83“同步电机试验方法”中3.8.1条明确指出, “对单台同步发电机通常是在以无脉动电源代替整流励磁和从电网断开电力变压器的情况下, 测量电话干扰系数(TIF)”[1]。

根据多台在厂内试验测试的发电机情况, 采用他励电源时, 其THF的试验值往往较计算值小。因此, 笔者认为, 这两台机测出的THF值偏大是由于试验时采用可控硅励磁方式造成的。其励磁电源, 通过整流产生较大脉动, 而发电机转子的电感量不足以将波形滤得很平。另一方面, 励磁变压器的一次侧, 是直接并接在发电机主引出线上的。而它的二次侧, 谐波分量是非常丰富的, 反过来对一次侧感应了大量谐波。这比电力变压器严重得多, 测出的数据在很大程度上受到励磁变压器的影响。

建议今后对 $e_v$ 及THF的试验, 尽量参照IEEE115-83标准中的条件, 以免将外部条件产生的影响, 误认为发电机本身的性能有问题。

(4) 测试的另一个结果是, 以均匀气隙替代非均匀气隙, 在保证电气性能的前提下, 使励磁安匝下降5.6%左右。若维持原设计不变, 则转子用铜量可下降5.6%。换句话说, 如转子用铜量不变, 则转子温升可下降10%左右。得到这个结果是令人鼓舞的。

### 3 采用均匀气隙后对电磁性能带来的影响及对策

以下将讨论, 如何在低速发电机设计中使用均匀气隙。

#### 3.1 关于 $e_v$ 及THF的问题

《大电机技术》№5, 1993年

以往的设计思想是采取各种措施来达到电压波形尽善尽美。笔者认为, 只要将 $e_v$ 及THF控制在标准允许范围内, 就能达到限制由于高次谐波而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程度, 即按容量分级对 $e_v$ 及THF提出了不同的要求。

由于采用了均匀气隙, 主磁场的波形变坏。要达标, 必须采取定子绕组短距、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。低速发电机多为分数槽绕组。如被试的两台发电机, 分数为 $2\frac{7}{10}$ , 其波形是容易达标的。有些机组, 如灯泡贯流式发电机, 其定子外径受到灯泡比的限制, 极距小。定子槽数的选择, 又受到电负荷、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 $1\sim 2$ 之间, 有时无法避免 $1\frac{1}{2}$ 、 $2$ 的采用。若采用上述措施无效, 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。

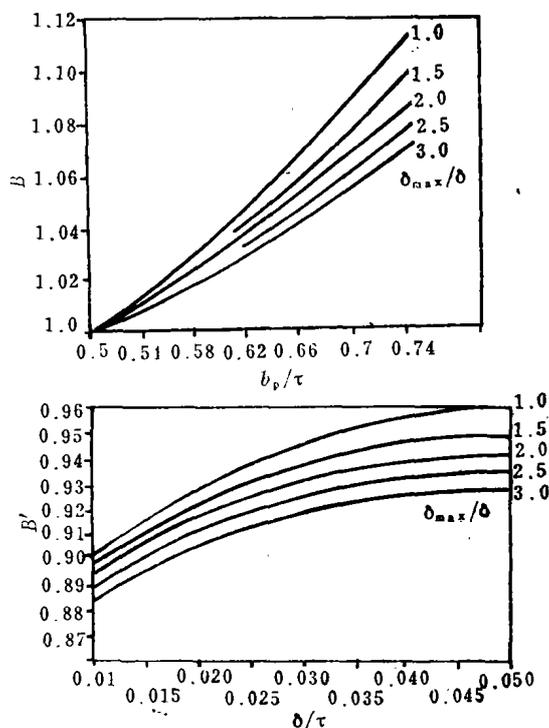


图2 磁场波形系数 $K_\phi$ 的确定 ( $K_\phi = B \cdot B'$ )  
图中 $\delta_{max}/\delta$ 应改为 $\delta_{max}/\delta_{min}$ , 图3同一——编注

### 3.2 关于各部磁密的问题

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  $\phi = k_\phi \cdot \phi_1^{[2]}$  及极靴磁通  $\phi_k = k_k \cdot \phi^{[2]}$ 。以上两式中系数  $k_\phi$ 、 $k_k$  (图2、3) [2] 直接受到  $\delta_{max}/\delta_{min}$  值的影响。这次试验的改型机，气隙磁密  $B_g$ 、齿部磁密  $B_{2,1,3}$  提高了 4.5%，轭部磁密提高了 16%，而磁极部分变化不大。

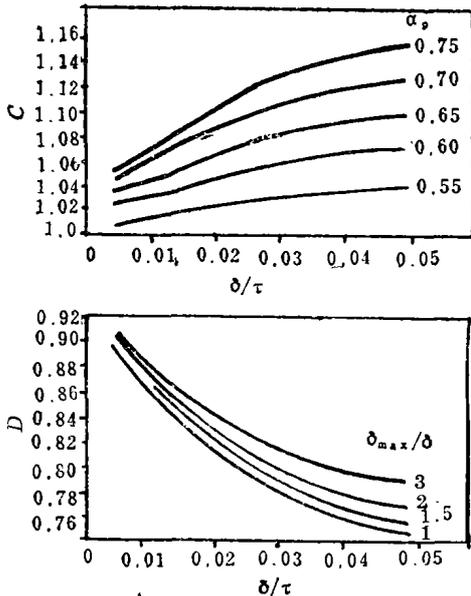


图3 极弧磁通系数  $k_k$  的确定 ( $k_k = C \cdot D$ )

### 3.3 对气隙系数的影响

气隙系数  $k_g = k_{g1} \cdot k_{g2} \cdot k_{g3}$ 。  $k_g$  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  $k_g$  值变大。这次试验的改型机，定子槽宽没有变， $k_g$  值较原型机增大 3.5%。 $k_{g1}$  的增大，对磁极表面附加损耗影响很大。在新设计发电机时，可以减小槽宽  $b_s$  来补偿。

### 3.4 对发电机效率的影响

由于采用均匀气隙后，主磁场波形变化，相应的一些损耗值也发生变化，尤其是附加损耗加大。以下的讨论，将引起较大变化的损耗项目提出。其变化的幅度，均以这次试验的改型机与原型机比较为基础。

#### (1) 励磁损耗 ( $p_f$ )

由于总的励磁安匝下降 5.6%，相应励磁

损耗下降 10%，磁极线圈温升下降 10%。

#### (2) 空载额定电压时极靴表面的附加损耗 ( $p_{Fe,p}$ )

在发电机主要尺寸无变化时， $p_{Fe,p}$  值与  $((k_{g1} - 1) \cdot B_g)^2$  成正比关系，也与磁极冲片的厚度有关。如前所述，改型机的  $k_{g1}$  值增大，相应的  $p_{Fe,p}$  值增大了 31%。由于绝对值较大，影响效率是相当可观的。若新设计发电机，则可以采取减小定子槽宽  $b_s$  及减薄磁极冲片厚度的措施把它降下来。

#### (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 ( $p_{t3}$ )

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 Y 接，对电压波形无影响，但  $p_{t3}$  相应增大 32%。相对值增加可观，但绝对值不大，不会对发电机效率产生大的影响。

#### (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 ( $p_{pt}$ )

$p_{pt}$  值的大小与  $\delta_{max}/\delta_{min}$  的比值成反比关系，与  $p_{Fe,p}$  成正比关系。采用均匀气隙后， $p_{pt}$  值相应为原型机的 22 倍。增加的相对值是惊人的，但由于绝对值不大，对效率不会产生重大影响。若  $p_{Fe,p}$  能下降， $p_{pt}$  值也能相应下降。

(5) 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后，改型机的效率下降 0.1%。在各种附加损耗中， $p_{Fe,p}$  的绝对值最大，对效率的影响也最大。我们试将改型机的磁极冲片厚度由 1.5 mm 改为 0.65 mm (低速发电机的磁极强度是不成问题的)，进行了校核，改型机的效率反较原型机提高 0.05%。若新设计时将  $b_s/t_1$  变小，则效率可进一步提高。

## 4 结束语

(1) 通过在 SF5000-40/425 低速发电机上将不均匀气隙改变为均匀气隙的试验，达到了降低励磁安匝的目的。

③  
13-16

# 水轮发电机磁轭对称等边的加工

Machining of the Symmetrical Equilaterals  
for Hydrogenerator Yokes

陈 绍 林秀玉 TM312.103

(福建水力发电设备厂)

Chen Shao Lin Xiuyu

(Fujian Hydroelectric Generating Equipment Works)

## 摘 要

A

对不同结构和大小的水轮发电机磁轭对称等边加工进行了论述和探讨, 以寻找较佳的加工工艺, 达到提高质量的目的。

## Abstract

Symmetrical equilateral machining of hydrogenerator yokes with different construction and dimension is discussed and inquired into, in order to find best processing technology and achieve the goal about quality improvement.

关键词 (key words)

水轮发电机 (hydrogenerator) 磁轭 (yoke) 对称等边加工 (symmetrical equilateral machining) 制造

(2) 这次试验主要是针对 $e_v$ 及THF以及额定励磁电流进行测试。关于损耗及效率的变化, 只有励磁损耗很明显地可测出, 而其余附加损耗仅仅是根据理论分析计算得出。从试验的角度看, 将各项附加损耗分项测得很精确也是很困难的, 这有待今后进一步地做工作。

(3) 在灯泡贯流式凸极同步发电机中, 由于定子卧式布置, 而且本身刚性差, 从机械角度考虑, 气隙值要求通常较常规机组大, 用户还希望能把 $\cos\phi$ 降到0.9左右而多发无功。该机定子外径受限, 约为常规机组60%左右, 散热条件极差, 故采用均匀气隙, 降低励磁安匝, 定能得到满意的效果。

(4) 对于 $e_v$ 及THF的测试, IEEE—115标准在1965年版本中, 还未对外部条件作规

定, 而1983年版本中补充了规定。目前我国有的质检单位在行业检查中, 还有意识地要把励磁系统 (尤其是可控硅励磁) 连接在一起来考核发电机的 $e_v$ 及THF。这显然是不合理的。建议“同步电机试验方法”国标修定时, 考虑这一因素。

## 参 考 文 献

- 1 美国电气及电子工程师学会, IEEE115—65、IEEE115—83 “同步电机试验方法”
- 2 电工专业指导性技术文件, 电指(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