

# 桥巩电站水轮发电机气隙稳定性分析

陈昌林

**摘要** 本文通过分析桥巩水轮发电机定子机械椭圆刚度和偏心刚度、转子机械椭圆刚度和偏心刚度、发电机电磁椭圆刚度和偏心刚度以及机组在不同工况下的变形,提出了一套计算分析发电机定、转子动态耦合振动及变形的计算方法,通过该耦合计算来确定发电机在不同工况下的气隙稳定性。

**关键词** 桥巩电站 水轮发电机 气隙 稳定性

## 1 引言

桥巩 57MW 贯流式机组是目前我公司研制生产的最大容量的贯流式机组,我们已经对该机组进行了详细的机械强度、机械动力特性和动力响应分析(另文介绍),但鉴于该机组平均气隙较小(只有 9.5mm),且运行工况较立式机组恶劣,因此有必要对该机组的气隙裕量进行分析。

## 2 相关的机组参数

机组的分析模型及相关的几何尺寸、质量、转动惯量由设计图纸提供,其余相关的参数为:

平均气隙	9.5mm
10%气隙不均匀磁拉力	410kN
半数磁极短路磁拉力	3691kN
额定扭矩	7400kN·m
两相短路扭矩	39200kN·m

## 3 定、转子机械刚度

采用有限元法对机组进行整体三维实体建模,分析模型(见图1),机组的各种机械刚度进行了计算。

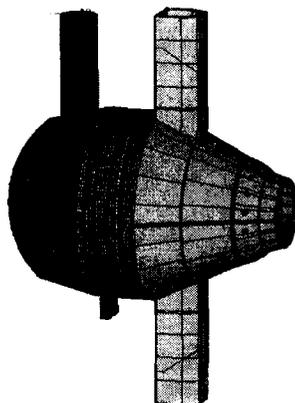


图1 机组三位有限元分析模型

### 3.1 导轴承支承刚度

发电机导轴承支承刚度

$$K_{FD} = 2.17 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

水轮机导轴承支承刚度

$$K_{SD} = 1.08 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

### 3.2 轴系刚度及初始变形

轴系在发电机转子中心处的横向刚度定义为在该处径向产生单位位移所需的力。

轴系刚度为轴的刚度  $K_{\text{shaft}}$  和两个导

轴承支承刚度( $K_{FD}, K_{SD}$ )的函数即:

$$K_{ss} = f_1(K_{FD}, K_{SD}, K_{ahaft}) \quad (1)$$

轴系在转子中心处的初始变形( $\delta_{ss}$ )为各工况下的静态水力,静态电磁力,静态机械力在该处产生的变形,轴系的变形为轴系刚度 $K_{ss}$ ,水力 $f_{hyd}$ ,电磁力 $f_{meg}$ 和机械力 $f_{mech}$ 的函数,即:

$$\delta_{ss} = f_2(f_{hyd}, f_{meg}, f_{mech}, K_{ss}) \quad (2)$$

对于桥巩机组,用转子动力学软件 ARMD 计算,分析模型见图 2。

转轴在发电机转子中心处的横向刚度 $K_{ss}$ :

$$K_{ss} = 9.60 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

额定工况下转子中心处的变形 $\delta_{ss}$ :

$$\delta_{ss} = 0.303 \text{ mm}$$

半数磁极短路工况下转子中心处的变形 $\delta_{ss}$ :

$$\delta_{ss} = 0.645 \text{ mm}$$

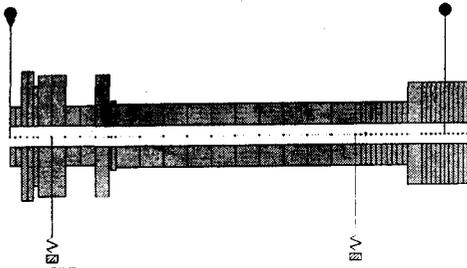


图 2 转子分析模型

### 3.3 发电机转子的椭圆刚度、偏心刚度和初始变形

采用有限元法对发电机转子支架进行整体三维实体建模,分析模型见图 3。转子椭圆刚度 $K_{rotor}^e$ ,转子偏心刚度 $K_{rotor}$ 和初始变形 $\delta_{rotor}$ 分别为:

$$K_{rotor}^e = 2.02 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

$$K_{rotor} = 3.35 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

额定工况下转子磁轭外缘的径向变形:

$$\delta_{rotor} = 0.408 \text{ mm}$$

半数磁极短路工况下转子

磁轭外缘的径向变形:

$$\delta_{rotor} = 0.970 \text{ mm}$$

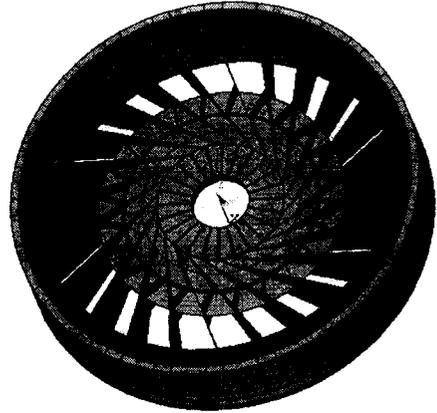


图 3 发电机转子分析模型

### 3.4 定子机座椭圆刚度、偏心刚度和初始变形

采用图 1 的分析模型,得到发电机定子机座的椭圆刚度 $K_{stator}^e$ ,偏心刚度 $K_{stator}$ 和初始变形 $\delta_{stator}$ 分别为:

$$K_{stator}^e = 8.84 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

$$K_{stator} = 1.80 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

额定工况下定子径向变形:

$$\delta_{stator} = 0.390 \text{ mm}$$

半数磁极短路工况下定子径向变形:

$$\delta_{stator} = 1.367 \text{ mm}$$

## 4 发电机电磁刚度

### 4.1 偏心电磁刚度

由机组的电磁设计参数可知,偏心电磁刚度 $K_{meg}$ 为:

$$\text{额定负荷时: } K_{meg} = 0.424 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

半数磁极短路时:  $K_{meg} = 0.212 \times 10^6$  N/mm

### 4.2 椭圆电磁刚度

由机组的电磁设计参数可知,椭圆电

磁刚度  $K_{meg}^e$  为:

额定负荷时:

$$K_{meg}^e = 0.848 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

半数磁极短路时:

$$K_{meg}^e = 0.424 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

## 5 发电机气隙裕度分析

### 5.1 机组的机械刚度

机组的机械刚度  $K_{mech}$  为转子刚度  $K_{rotor}$ , 轴刚度  $K_{shaft}$ , 导轴承刚度  $K_{brg}$  和定子刚度  $K_{stator}$  的函数, 即:

$$K_{mech} = f(K_{shaft}, K_{rotor}, K_{brg}, K_{stator}) \quad (3)$$

结合前面的分析,  $K_{mech}$  可以写成:

$$K_{mech} = 1 / (1/K_{ss} + 1/K_{rotor} + 1/K_{stator}) \quad (4)$$

其中:  $K_{rotor}$  应为转子的椭圆刚度  $Ke_{rotor}$

$K_{stator}$  为定子的横向偏心刚度, 即:

$$K_{mech} = 1 / (1/K_{ss} + 1/Ke_{rotor} + 1/K_{stator}) \quad (5)$$

对于桥机机组:

$$K_{mech} = 0.866 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

### 5.2 机组的偏心电磁刚度

由 4.1 可知, 发电机偏心电磁刚度  $K_{meg}$  为:

$$\text{额定负荷时: } K_{meg} = 0.424 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

$$\text{半数磁极短路时: } K_{meg} = 0.212 \times 10^6 \text{ N/mm}$$

### 5.3 机组的静态变形

机组的静态变形  $E_{static}$  为静态力所引起的轴变形  $\delta_{ss}$ 、转子变形  $\delta_{rotor}$ 、定子变形  $\delta_{stator}$  和机组制造、安装偏心  $E_{mi}$  之和, 设机组转子中心在制造和安装时的初始偏心为气隙的 1.2%, 由前面分析可知, 机组静态变形  $E_{static}$  为:

$$\text{额定负荷时: } E_{static} = 1.215 \text{ mm}$$

$$\text{半数磁极短路时: } E_{static} = 3.096 \text{ mm}$$

### 5.4 机组的动态变形 $E_{add}$

机组的动态变形包括轴系、转子和定子的变形, 它们不仅自身相互耦合, 而且和电磁力、水力、机械力相耦合。

设定转子系统为线性系统, 则机组的动态变形  $E_{add}$  为以下方程的解。

$$K_{meg} \cdot (E_{static} + x) - K_{mech} \cdot x = 0$$

对桥机机组的动态变形其结果如下:

$$\text{额定负荷时: } E_{add} = 1.166 \text{ mm}$$

$$\text{半数磁极段落时: } E_{add} = 1.004 \text{ mm}$$

机组总的变形 ( $E_{act}$ ) = 静态变形 ( $E_{static}$ ) + 动态变形 ( $E_{add}$ )

对于桥机机组, 总的变形为:

$$\text{额定负荷时: } E_{act} = 2.381 \text{ mm}$$

$$\text{半数磁极段落时: } E_{act} = 4.100 \text{ mm}$$

机组动静态分析图形见图 4 和图 5。

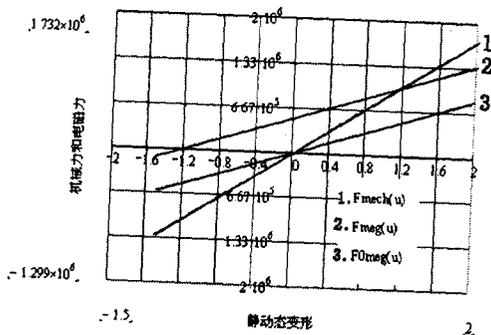


图 4 机组额定运行定转子系统动静态变形

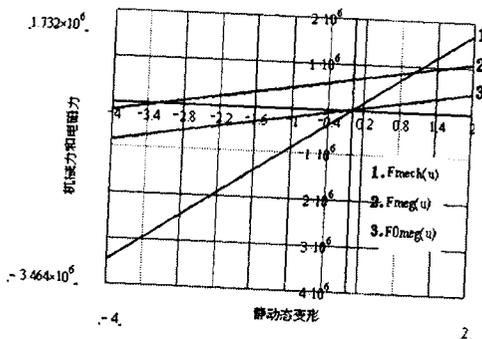


图 5 机组半数磁极短路工况下定转子系统动静态形分析图

## 6 结 论

通过计算分析得知:

- (1) 发电机转子椭圆刚度大于电磁椭圆刚度 2 倍。
- (2) 发电机定子机座椭圆刚度和偏心

刚度大于电磁椭圆刚度 2 倍。

(3) 在额定运行工况和半数磁极短路工况下, 发电机定转子系统总的变形小于机组平均气隙的一半。

(4) 结合以上 3 点分析, 可知发电机定转子系统是稳定的。

· 信 息 ·

## 东方电机开发出国际先进水平的锦屏一级电站 模 型 水 轮 机

东方电机股份有限公司水力开发人员潜心钻研, 为锦屏一级电站开发出国际先进水平的高水头模型水轮机, 创下了东方电机高水头混流式水轮机水力开发的历史新高, 为东方电机于 2006 年 12 月 22 日与二滩水电开发公司签订锦屏一级电站 6 × 600MW 水轮机及附属设备供货合同提供了技术保证。

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内, 是雅砻江干流五个梯级中的龙头水电站, 其下游梯级为锦屏二级、官地、二滩和桐子林水电站。电站安装 6 台单机容量 600MW 的混流式机组, 总装机容量 3600MW, 年均发电量 166.2 亿 kWh, 按计划 2013 年第一台机组投产发电。2014 年 6 台机组全部投产。

锦屏一级水电站装机容量大, 单机容量大, 水轮机水头高, 水轮机过流部件尺寸大。因此, 对水轮机水力性能参数选择、水轮机运行稳定性、水轮机设计和制造工艺都做了大量的研究、试验工作。2005 年以来, 东方电机对该项目给予了高度重视, 在各个环节作了充分的准备和周密的安排, 制定了严密的工作计划。经过近两年间的多次优化, 自主开发出了达到国际先进水平的转轮, 并于 2006 年 11 月 16 日在中国水利水电科学研究院水力机电研究所中立试验台上通过了用户的见证试验。

(余小波)