

# 水轮发电机转子典型机电故障的不平衡磁拉力研究

卢育丽 林凯

广东粤海飞来峡水力发电有限公司乐昌峡分公司

**摘要:** 不平衡磁拉力就是单边不平衡拉力, 该现象主要是产生在水轮发电机定子之间, 主要是因为安装不当或者制造质量偏心导致定子空气间隙不均匀, 不平衡磁拉力会引发过大的主轴摆度与机组的振动, 甚至可以危及到机组的安全运行。本文利用某电站发生的不平衡磁拉力的典型事故案例进行深入研究, 通过建立与我厂参数相同的水轮发电机组的仿真模型, 分别对转子绕组匝间短路以及转子动、静偏心故障的模拟, 进行各种故障状态下的不平衡拉力的计算, 进而研究转子绕组匝间短路、转子偏心的方向和程度对不平衡拉力方向和大小影响。

**关键词:** 水轮发电机; 转子; 典型机电故障; 不平衡磁拉力

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.14.071

## 引言

实践证明, 影响水电机组运行稳定性的因素有三个: 电气、机械和水力。在电气的问题因素中最典型的的就是径向不平衡磁拉力。如果水轮发电机安装不当或者自身质量偏心, 就会造成定子腔内气隙不均匀, 从而导致单边不平衡磁拉力在定转子之间产生, 转子轴系和定子机座在这种不平衡磁拉力的作用下, 会出现主轴摆度与机组振动过大, 甚至威胁到整个机组的运行。所以, 在水电机组的调试过程中, 必须严格检测是否存在不平衡磁拉力, 发现问题要及时查找原因并进行解决处理。本文通过具体案例的剖析, 对不平衡磁拉力的现象进行深入研究。

## 一、不平衡磁拉力现象描述

某电站的水轮发电机组在升压的过程中, 突然增加了主轴摆度与定子机座振动的幅度, 通过加100%Ue励磁与未加励磁状态下, 主轴摆度与定子机座振动的对比, 如图1、图2所示。其中, 上导摆度的幅值从358  $\mu\text{m}$ 增加到660  $\mu\text{m}$ , 下导摆度幅值从381  $\mu\text{m}$ 增加到743  $\mu\text{m}$ , 定子机座水平振动从26  $\mu\text{m}$ 增加到206  $\mu\text{m}$ , 水导摆度幅值从418  $\mu\text{m}$ 增加到573  $\mu\text{m}$ , 水轮发电机组因为振动过大, 难以保证运行的安全。

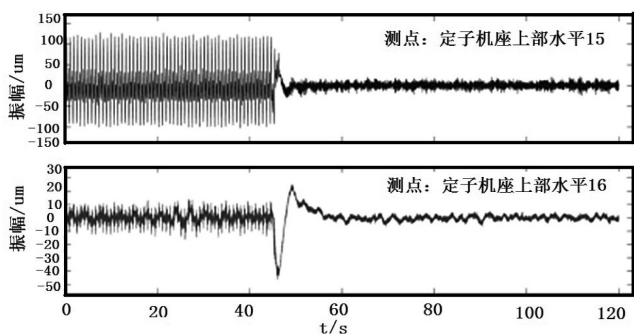


图1 加100%Ue与不加励磁定子机座振动时域波形对比图

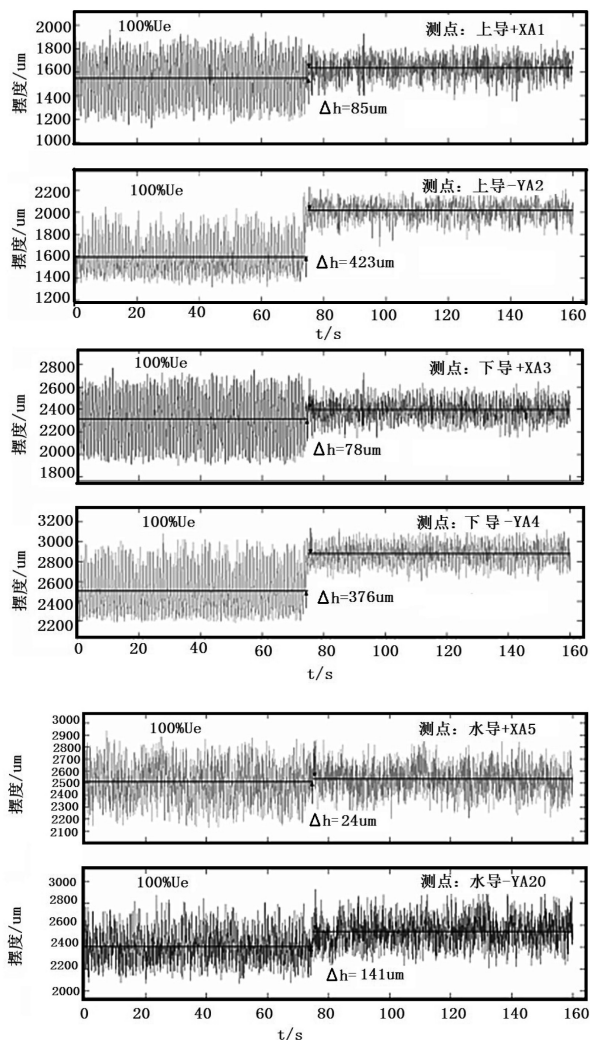


图2 加100%Ue与不加励磁主轴摆度时域波形对比图

## 二、水轮发电机组仿真模型搭建原理

### (一) 建立定子回路

进行定子每相并联可以通过6条支路, 绕组电阻和端部电抗能够串联不同支路, 同时每相绕组串联电抗及负载绕组。如果是对水轮发电机组空载操作的模拟, 可以利用无穷大的数值设定负载电阻与电抗, 可以通过子绕组端部开路完成。如果是对机组的额定负载操作的模拟, 有必要将额定值作为电感和每相负载设定。

### (二) 建立转子回路

该机组的转子绕组为总共为22匝的散热匝结构的磁极线圈。22对级的转子磁极, 有44个转子磁极在外电路中互相串联, 同时还与外加励磁直流、端部电抗、接转子电阻电流源并联。

### (三) 施加机械负载

水轮发电机的原理是从机械能转换为电能, 也就

是将机械能转换为电能的过程，在原动机转轴上产生动能，绕组上产生电能。因为计算的简化，原动力模型可以忽略，可以利用恒转速负载作为MotionSetup\_in机械输入端口，同时针对原动机的模拟可以利用MotionSetup\_out机械输出端口接地设置完成<sup>[1]</sup>。

### 三、不平衡磁拉力计算方式

#### (一) 线性解析表达式

一般状态下，不平衡磁拉力方向等同于转子偏心的方向，不平衡拉力会加重转子的偏心程度，而偏心程度的加剧会让水力机组的振动加大。当前，不平衡拉力与偏心率的线性关系为典型的正比，在发展过程中完全简化为如下公式：

$$F = \beta \pi D L \left( \frac{B}{0.5} \right)^2 \frac{e}{\delta} \quad (1)$$

以上公式中，转子的长度设置为L，m；偏心距离设置为e，mm；用D表示转子的直径，m；间隙正常性为δ，mm；磁密度设定为B，T；系数利用β表示，很多因素左右系数的大小，比如槽、绕组和阻尼结构、磁场分布、发电机的种类等。

#### (二) 非线性解析表达式

当下，通过完全表达式计算不平衡磁拉力，主要通过Fourier级数形式，源头是气隙磁导展开的级数，然后就能够利用含励磁电流和气隙磁导的函数表示磁通量，借助合理应用Maxwell应力积分，有效求解径向磁通量密度和周向，该模式左右和影响了以后的不平衡磁拉力的计算，逐渐成为最有效的不平衡磁拉力计算处理模式。

具体来说，设定α为定子与转子之间的气隙的位置角，将r设定为转子与定子的中心距离，将γ设定为方位角，便形成定子与转子之间气隙的表达式如下：

$$\delta(\alpha, t) \approx \delta_0 - r_1 \cos(\alpha - \gamma) \quad (2)$$

式(2)中，不偏心时转子的平均气隙长度为δ<sub>0</sub>。气隙磁导为：

$$\Lambda(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta(\alpha, t)} = \sum_{n=0}^{\infty} \Lambda_n \cos[n(\alpha - \gamma)] \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\delta_0} \text{ 为相对偏心。}$$

针对水轮发电机的实际应用，转子基本可以满足ε = r / δ<sub>0</sub> < 1的几何参数，因此，要将气隙磁导展开，以级数的形式确定空气磁导系数μ，将气隙磁导展开的系数为：

$$\Lambda_n \begin{cases} \frac{\mu_0}{\delta_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}}, n = 0 \\ 2\mu_0 \frac{1}{\delta_0 \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon} \right]^n, n > 0 \end{cases} \quad (4)$$

通常情况下，展开的磁导系数达到三级，实际上就会远远大于3，因为水轮机机组会有较多的磁极对数。因

此，利用Maxwell应力积分方法便能够获得不平衡磁拉力F<sub>x-ump</sub>、F<sub>y-ump</sub>，如下式：

$$\begin{bmatrix} F_{x-ump} \\ F_{y-ump} \end{bmatrix} = \frac{RL\pi k_f^2 I_f^2}{4\mu_0} (2\Lambda_0\Lambda_1 + \Lambda_1\Lambda_2 + \Lambda_2\Lambda_3) \begin{bmatrix} \cos\gamma \\ \sin\gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### (三) 数值计算方法

比起以上两种方式，利用数值法计算不平衡磁拉力，尽管过程繁琐却比较精准，不但能够求解相对复杂边界条件的电磁场，并且在求解的过程中，还可对某些非线性原因进行考查，例如非线性的铁心饱和、铁磁介质等，力求通过最佳模式求解发电机内部磁场。数值计算方法包括有限元法和线差分法两种，本文主要采用有限元法的模型计算。数值计算的有限元法主要是基于微观的角度，进行磁场区域和不平衡拉力的大小，可以充分考虑诸多影响因素对不平衡磁拉力的影响程度，也包括励磁状况因素<sup>[2]</sup>。

#### 三、源于转子偏心故障

静偏心和动偏心这两种表现构成转子偏心故障，如图3所示。O<sub>r</sub>和O<sub>s</sub>分别代表转子和定子的几何中心，一旦发生转子偏心故障，就不能重合转子和定子的几何中心；一旦动偏心故障发生，转子旋转的几何中心是O<sub>s</sub>；如果故障发生在静偏心，转子会围绕自身的O<sub>r</sub>几何中心旋转。将发电机转子偏心的偏心度设定为ε：

$$\varepsilon = O_{rs} / \delta \quad (6)$$

上式中，将定子与转子的核心距离设定为O<sub>rs</sub>，δ则设定为气隙的长度的平均值。

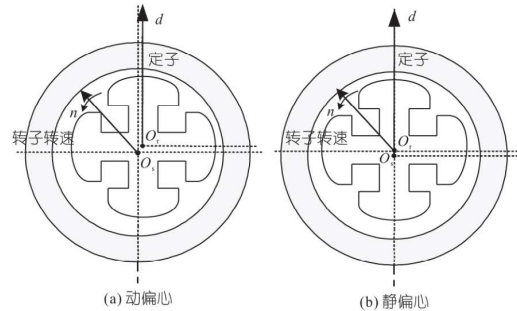


图3 发电机转子偏心示意图

#### (一) 源于动偏心故障

根据《水轮发电机组安装技术规范》相关规定，136.4rpm额定转速的机组，不允许超出0.35mm的转轴水平摆度。水轮发电机经过折算后最大的实际规定的偏心程度大约为ε = 0.5%，而仿真模拟中因为有限元的精度，遭受的不平衡拉力不能通过很小的偏心程度计算出来。因此采用间接计算。

水轮机额定负载状况下，可以分别设定ε = 10%、ε = 20%、ε = 30%，偏心方向角α = 30°、α = 45°、α = 60°、α = 90°，进行相关数据的有效计算。倘若表现出30°的偏心方向，因为遭受动偏心故障的影响，会大幅度增强转子小气隙侧径向磁场，与此同时，也会相应增大负向、正向磁通密度幅值；倘若持续在削弱大气隙侧径向磁场，就会逐渐减小正向和负向磁通密度幅值。根据本文的计算模式和主磁场数据，有效计算不平

衡磁拉力相关的数据。不平衡磁拉力在动偏心的状态下,会随着转子同步旋转。不平衡磁拉力值会随着转子动偏心程度加大而增大,也就是说动偏心的程度与不平衡磁拉力大小成正比,同时,动偏心方向与不平衡磁拉力方向一致,偏差最大不超过 $10^\circ$ 。如果该磁拉力叠加了原始不平衡力,转子基频振动会加剧。为了对该偏心程度下的不平衡磁拉力进行评估,要按照偏心程度与不平衡磁拉力的关系,求出不平衡磁拉力的平均值。正常的平均值为 $36.142\text{KN}$ 、偏心 $10\%$ 为 $597.420\text{KN}$ 、偏心 $20\%$ 为 $1178.110\text{KN}$ 、偏心 $30\%$ 为 $1818.589\text{KN}$ 。通过模拟数据,获取偏心度与不平衡磁拉力两者间正比例函数,大约数值为 $F=6040\varepsilon$ 。该计算方式也可以有效应用在不同的不平衡磁拉力计算,前提是通过数值仿真求取不同工况下两者之间正比例函数 $F=f(\varepsilon)$ 的表达式<sup>[3]</sup>。

## (二) 源于静偏心故障

水轮发电机的两种偏心特点不同,不变是静偏心故障下任意圆周位置的气隙的特点,主要表现为较大气隙处为恒大气隙,较小气隙表现为恒小。但转子每转过一对磁极,该偏心状态会产生周期性变化,具体表现在气隙主磁场与不平衡磁拉力幅值的不对称上,但因为水轮发电机比起汽轮发电机具备更多的极对数,静偏心导致的不平衡拉力不会受到旋转的影响,可以不加计算。

如果是额定负载操作,所设置的转子静偏心分别 $\varepsilon=10\%$ 、 $\varepsilon=20\%$ 、 $\varepsilon=30\%$ ,偏心方向角 $\alpha=30^\circ$ 、 $\alpha=45^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ ,计算相关的数据。在静偏心故障情况下,偏心程度加重会增大不平衡拉力,体现为正比例关系,基本等同于动偏心情况,随着偏心的方向改变而改变不平衡磁拉力,等同于动偏心的变化规律。

实际上,磁场不对称现象,静偏心和动偏心两者的结果是一致的,因此,形成的不平衡拉力变化规律也近似。通过发电机振动规律可言显现二者的区别,动偏心形成的转子振动是基频,但静偏心更注重将转子拉向发电机一侧,没有明显的振动特征,所以,监测和评估难以准确判别静偏心故障。倘若是极其严重的静偏心,碰撞的风险会增加,主要是定子和转子铁心的碰撞,该事件国外较多。因此,研究避免故障措施势在必行,避免故障趋势继续恶化<sup>[4]</sup>。

## 四、源于转子绕组匝间短路故障

### (一) 空载工况下的情况

倘若是空载操作状态下,发电机转子设置#1磁极绕组故障的差异性,包括正常状态、 $5\%$ 短路状态、 $10\%$ 短路状态、 $15\%$ 短路状态、 $20\%$ 短路状态,在进行不平衡磁拉力结果求得时,转子#1故障磁极转至 $45^\circ$ 时可以确定为方向时刻,进行主磁场数据的求解,获取相关的拉力值。因为发生了转子绕组匝间短路故障,#1磁极的径向主磁场会发生局部的减弱,而其他磁极的磁场没有变化。随着短路程度的加剧,不平衡磁拉力值也相应增大,也就是不平衡磁拉力会随着短路的严重而加快增长速度。这是因为#1磁极短路程度在不断地严重,磁场和相邻磁场饱和度在显著降低,气隙主磁场迅速下降,进而也加快了不平衡磁力的增长速度。实验显示,主要是在 $225^\circ$ 附近确定平衡拉力方向,这是因

为转子#1故障磁极方向时刻为 $45^\circ$ 时,有超强的磁极磁场,因此,合力指向与故障磁极相反的方向。

### (二) 源于负载工况

在该机组额定负载操作下,发电机转子#1磁极绕组分别设置故障不同的差异,包括正常状态、 $5\%$ 短路状态、 $10\%$ 短路状态、 $15\%$ 短路、 $20\%$ 短路,在不平衡磁拉力的计算时,选择的方向时刻是转子#1故障磁极转至 $-60^\circ$ 时,求取径向主磁场数据。通过分析不难看出,在转子#1磁极绕组存在差异性的短路状态,会明显减弱故障极的径向磁场,而比较远的故障极的气隙磁场不存在明显的变化。经过比较不难发现,主磁场的对称性在负载运行的状态下不如空载的状态,关键的影响因素为电枢磁场中的谐波。根据该机组的主磁场数据和本文的计算模式,求解不平衡拉力的受力值。数据显示,额定负载状态下的水轮机组,不平衡磁拉力更大,随着短路程度的增加,不平衡磁拉力明显变缓。这足以说明负载运行时,加重振动状态的主要诱因是转子绕组匝间短路故障,电枢反应磁场一定程度上平抑了磁场不对称状况,导致严重短路状态下放缓了不平衡拉力的增速。转子#1磁极呈现为 $-60^\circ$ 的方向时,理论上是 $120^\circ$ 不平衡磁拉力的方向,但实际情况是一定方向差不可避免存在,可能是 $30^\circ$ 左右,影响因素气隙磁场扭斜,也与计算误差及磁场谐波等因素有关<sup>[5]</sup>。

## 五、结束语

1. 研究显示,转子动偏心程度的增加会增大不平衡磁拉力值,而动偏心的角度对其没有影响。允许范围内的转子动偏心幅度的增大不会加大不平衡磁拉力幅值,在容许的转子动偏心幅度下,不显示很大的不平衡磁拉力幅值,因此不能确定为引发振动的主要因素。

2. 静偏心故障难以借助检测振动发现,因为静偏心故障等同于实际静偏心方向引发的不平衡,但该故障会促成定转子铁心碰撞,可通过其碰撞严重故障程度,进行静偏心故障的观察研究。

3. 在空载或负载情况下,水轮发电机转子绕组匝间短路会引发明显的不平衡磁拉力。因此,必须有效在线监测转子匝间短路故障,尽量减少剧烈振动对机组的冲击。

## 参考文献

- [1] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等.大型水轮发电机励磁绕组匝间短路的稳态故障特征分析[J].电力系统自动化,2011,35(4):40-45.
- [2] 周理兵,马志云,大型水轮发电机不同工况下不平衡磁拉力[J].大电机技术,2002(2):18-20.
- [3] 郭丹,何永勇,褚福磊,不平衡磁拉力及对偏心转子系统振动的影响[J].工程力学,2003,20(2):69-70.
- [4] 冯建军,武桦,吴广宽,郭鹏程,罗兴铸.偏工况下混流式水轮机压力脉动数值仿真及其改善措施研究[J].水利学报,2014,45(9):1099-1105.
- [5] 张兴,赖喜德,廖姣,张文明.混流式水轮机尾水管涡带及其改善措施研究[J].水力发电学报,2017,36(6):79-85.