

水轮发电机组振动的主要特征及测试与识别

哈尔滨瑞格大电机技术有限公司 (哈尔滨 150090) 姜先军

【摘要】 通过对水轮发电机组振动机理的调查研究,提出了水轮发电机组振动信号的一般特征,并由振动特征判别振动原因。

【关键词】 水轮发电机组 振动 频率 转速 机械

水轮发电机组的振动是水电站存在的一个普遍问题,有设计、制造、安装、检修、运行等方面的原因。运行中的机组都存在不同程度的振动,但这种振动是不可避免的,所以电站只能在一定的条件下将振动尽量地减小,使振动值限制在允许的范围内。当振动超过规定的允许值时,便会影响机组的供电质量、安全运行和机组的寿命,需及时找出原因并采取措施消除。

一、水轮发电机组振动主要特征

水轮发电机组的振动都属于有阻尼受迫振动,按其形式可分为受迫振动和自激振动,受迫振动是由于干扰力引起的,而干扰力的存在与否跟振动无关,即使振动停止,干扰力也仍然存在。自激振动中维持振动的干扰力是由物体运动本身产生或所控制的,当运动停止,干扰力也就消失。根据干扰力的不同形式机组振动可分为机械振动、水力振动及电磁振动。

1. 机械方面

机械振动的干扰力源是机组的机械部分,主要有以下几个部分。

(1) 转子质量不平衡 由于转子质量不平衡,转子重心与轴心产生一个偏心距。当主轴以角速度旋转时,由于失衡质量离心惯性力的作用,主轴将产生弯曲变形。角速度越大主轴变形也就越大,振动也越严重。当角速度接近临界转速时,振动增大产生共振。其主要特征为振幅敏感地随着机组转速变化,振幅一般与转速的二次方成正比,且水平振动较大。

(2) 机组轴线不正 在旋转机械中最理想的是机组

中心、旋转中心及轴线三者重合,最不理想的是机组中心、旋转中心与轴线不重合的状态。介于二者之间的是旋转中心与机组中心重合,机组轴线不正的主要表现形式是轴线与推力轴承底平面不垂直,由于机组转子的总轴向力不通过推力轴承中心,就产生一个偏心力矩。随着转子的旋转,偏心力矩也同时旋转,使各支柱螺栓受脉动力,其脉动频率与转速频率相同,从而产生推力轴承各支柱螺栓的轴向振动,转子也就随之产生振摆。轴线不正,也是引起径向振动的原因。其特征为机组在空载低转速运行时,机组便有明显振动。

(3) 轴承缺陷 在运行中当导轴承松动,刚性不足,导轴承间隙过大,运行不稳而润滑又不良时,就会发生干摩擦,引起反向弓状回旋,即横向振动力,其方向和轴的旋转方向相反,频率相同。导轴承间隙过小,会把转轴的振动传给支座和基础,导轴承间隙过大,转轴振动大。机组转动部件与固定部件相碰(或摩擦)所引起的机组振动,其特征为振动较强烈,并常常伴有撞击声;轴承间隙过大、主轴过细、轴的刚度不够所引起的振动,其特征为机组振幅随机组负荷变化较明显。

2. 水力方面

(1) 水轮机进入流道蜗壳、导叶中的不均匀流场均会产生旋涡,形成涡带进入转轮引起机组振动,其主要特征为振动随机组运行工况变化而变化,且时而明显,时而消失。若是因蜗壳中的不均匀流场所引起的振动,其振动频率可表示为:

$$f = nz_2/60$$

式中 z_2 ——转轮叶片数目；

n ——为机组转速。

并且，这类振动多半发生在高比速轴流式水轮机中；若是因导叶中的不均匀流场所引起的机组振动，则多半发生在低比速水轮机中。该类水轮机转轮离导叶很近，导叶中的不均匀水流对转轮影响很大。

(2) 由转轮叶片尾部的卡门涡列所诱发的机组振动，因卡门涡列的形成与流体速度和绕流体尾部的断面形状和尺寸有关，所以该振动特征为振幅随过机流量增加而明显增大，且其振动频率可表示为：

$$f = (S_t w_1) / d$$

式中 w_1 ——转轮进口处的水流相对速度；

S_t ——流体力学中的斯特罗哈数，实验测得 $S_t = 0.18 \sim 0.22$ ；

d ——绕流体尾部的最大宽度。

(3) 因水轮机偏离设计工况较远，尤其是在低水头、低负荷运动时，转轮出口产生旋转水流，形成偏心涡带，使在尾水管中产生压力脉动并诱发机组振动。此时振动强弱与水轮机的运行工况关系较密切，某些区域振动强烈，某些区域振动又明显减小，甚至恢复正常。其振动频率一般为：

$$f = (1/4 \sim 1/3) f_0$$

式中 f_0 ——为机组转速频率。

(4) 高水头混流式水轮机因止漏环结构形式和间隙组合不当及运行间隙不均匀引起水压力脉动诱发的机组振动，该振动特征为：振动摆度及压力脉动幅值，均随机组负荷和过机流量的增加而明显增大。

3. 电磁方面

(1) 发电机转动部分因受不平衡力（这些不平衡力主要来自于周期性的不平衡磁拉力分量，定、转子不均匀气隙所引起的作用力，转子线圈短路时引起的力和发电机在不对称工况下运行时产生的力）的作用下产生的机组振动，其振动特征为振动随励磁电流增大而增大，且上机架处振动较为明显。

(2) 当一个磁极因短路而引起磁动势减小时，和它相对应的那个磁极的磁动势并没有变，因而出现一个跟转子一起旋转的辐向不平衡磁拉力，引起转子振动，其振动特征为振动随定子电流增大而增大，振级与电流几乎呈线性关系，且上机架处振动最为明显。

(3) 因定子铁心组合缝松动或定子铁心松动所引起的机组振动，其特征为振动随机组转速变化较明显，且当机组载上一定负荷后，其振幅又随时间增长而减小，对因定子铁心组合缝松动所引起的振动，还有一特征为其振动频率一般为电流频率的两倍。

(4) 定子绕组固定不良，在较高电气负荷和电磁负荷作用下使绕组及机组产生振动。其振动特点为振动随转速、负荷运行工况变化而变化，上机架处振动亦较为明显，但不会出现载上某一负荷后其振动随时间增长而减小的情况。

二、机组稳定性试验和振动测试的关系

对水轮发电机组进行一系列稳定性试验，判别引起机组振动的主要因素。

(1) 机组起动试验 在机组发出起动命令时就以较慢速度开启录波仪器，待机组转动后，随着机组转速变化，按需要完整记录机组起动过程的振动信号和其他状态参数。

(2) 变速试验 分别在各种转速下测量机组典型部位，如上导、上机架、主轴联接法兰、水导轴承等的振幅或频率。

1) 若机组在 60% ~ 100% 的额定转速范围内运行时，振幅一直很大，改变转速对振幅变化不敏感，而振动频率又与机组转动频率基本一致，则机组振动原因大都是由于轴线曲折、轴承间隙未调好，导轴承不同心、主轴转动部件与固定部件有偏磨等。

2) 若振幅随机组转速增加而迅速增大（一般振幅与转速的二次方成正比），而振动频率又与转动频率一致时，其振动原因多半是转动部件的动（静）不平衡。

3) 若振幅随机组转速增加而增大，但变化速度一般，上机架处振动较明显，而振动频率又与发电机主极频率一致或是其倍数，载上某一负荷后，振幅又逐渐随时间增长而减小，则振动原因可能是发电机定子铁心组合间隙松动或定子铁心松动。

(3) 空载无励磁试验 机组在空载额定转速工况下，不加励磁电压，稳定运行半小时，监视各部位振动、摆度及压力脉动值的变化情况和变化规律。

(4) 空载有励磁试验 机组在额定转速下，载上励磁，改变励磁电流，观察各典型部位振动随励磁电流的变化。若振幅随励磁电流增大而增大，则不平衡磁拉力是引起机组振动的主要原因。需检查发电机定、转子空

气隙是否均匀,磁极线圈有无发生匝间短路、磁极背部与磁轭间是否出现气隙等。

(5) 变负荷、调相或补气试验 改变机组负荷(25%、50%、75%、100%)每个工况至少稳定5~10min,测量各种负荷下机组各典型部位的振幅及导叶接力器行程,绘制负荷与振幅或接力器行程与振幅的关系曲线。若振幅随机组负荷(或接力器行程)增减而增减,而机组在调相运行时振幅又大幅度降低,且水轮机导轴承处的振幅变化又较其他部位更为明显时,则水力不平衡是引起机组振动的主要原因。若振动仅在某一负荷区域(经电站实测,对应导叶开度在 $32% < \theta < 82%$)运行时较为强烈,而避开该区域时,振动又明显减小,则尾水管中产生偏心涡带是引起机组振动的主要原因。另外,若在机组振动较强烈的运行区域做补气试验,向尾水管补气,测量水导轴承处或尾水管扩散段顶板处的振动。与不补气相同工况作比较,若补气前后有明显差异,则说明机组振动原因也主要来自尾水管中的偏心涡带。

(6) 调速器手动、自动运行工况 对比调速器在手动和自动控制状态下对机组稳定运行的影响。

(7) 甩负荷试验 机组大修后,在投入运行之前,还应做甩负荷试验,检验调速器性能,记录机组转速上升、下降过渡过程、导叶开度变化过程、压力脉动以及机组振动和摆度的变化。

三、振动原因分析

1. 以振动频率分析振动原因

在机组典型部位带有录波存储功能的测振仪,将记录的振动记号,作时域、频域变换,进行频谱分析,以此来判断振动原因。

(1) 若振动频率与机组转动频率一致,则机组转动部分质量不平衡、轴线曲折、导轴承间隙不适、主轴法兰密封有偏磨、水轮机迷宫间隙不均匀是引起机组振动的主要原因。

(2) 若振动频率为发电机电流频率(我国电流频率为50Hz)的二倍,则可能是定子铁心组合缝松动、发电机负荷电流所引起的机组振动。

(3) 若振动频率为转速频率乘以发电机磁极对数,则多半是由于发电机气隙不均匀所引起的机组振动。

(4) 若振动频率分别为转速频率乘以活动导叶数或转动频率乘以转轮叶片数,则振动分别是因导叶开口不均匀或转轮开口不均匀所致。

2. 由振动部位判别振动原因

根据长期运行所积累的经验,由机组振动发生的不同部位,也可大致判别振动原因。

(1) 若在水导轴承处的振动比其他部位较为明显时,则可能是蜗壳、导叶中的水力不平衡(该水力不平衡主要来自蜗壳、导叶中的不均匀流场和导叶开口不均匀、转轮线型、间隙、开口不均匀)所引起的机械振动。

(2) 若在水导轴承处的振动比其他部位较为明显时,则可能是蜗壳、导叶及转轮中的水力不平衡(该水力不平衡主要来自于蜗壳、导叶中的不均匀流场和导叶开口不均匀,转轮线型、间隙、开口不均匀)所引起的机组振动。

(3) 若上机架处振动较为明显时,则振动原因多半来自于机组推力轴承(仅对悬式机组)、上导轴承缺陷(间隙摆度调整不适合)、故障或机组轴线有曲折、机组中心发生变化或发电机零部件有缺陷或故障。

(4) 若因转轮叶片出水边线型差异、叶片尾部形成卡门涡列、尾水管中产生偏心涡带等引起的机组振动,则在压力钢管、尾水管顶板均可测得明显振动,蜗壳中会出现较大水压波动。

四、结语

综上所述,振动是影响水轮发电机组正常运行和危害机组寿命的主要故障,对振动及时进行故障诊断,有利于提高水轮发电机组的安全、经济运行水平,可以为我国的水电生产带来巨大的经济效益。要清除水轮发电机组振动的故障,必须寻找引起机组振动的原因。主要介绍如何依据诱发机组振动的某些特征,捕捉其振动的主要原因。为简化问题,不考虑引起机组振动诸因素间的相互影响,但对分析机组振动的主要原因,仍有较好的参考作用。GM (收稿日期:2005/08/29)

“泵产品用户调查”结果发布会暨产业论坛将于2006年6月在沈阳举行,2005年度泵产品用户满意十佳企业即将揭晓!