

工作研究

水轮发电机组运行中的振动分析

刘元秀

(中国水电建设集团四川电力开发有限责任公司,四川成都 610041)

摘要:水轮发电机组运行时,必然会产生振动,在掌握各种振动特征的基础上,针对机组的实际振动状态,科学的方法,逐一排除疑点,缩小故障原因的范围,以期待尽快得到正确的诊断结果,尽早处理,防止故障的进一步扩大,避免重大事故的发生,保障水轮机的安全、稳定运行。

关键词:水轮发电机组;振动;原因分析;处理措施

中图分类号:[TV734.2+1];R852.25

文献标识码:B

文章编号:1001-2184(2013)06-0141-05

2012年底,我国水电装机容量已达11.44亿kW,随着装机的增加,对我国水电企业设备维护与养护工作提出了更高的要求。在现代水电站的运行维护中,水轮机组异常振动是常见的异常现象。如何快速的判断振动源并进行相应的措施是有效保障机组运行安全的关键,也是目前水电站设备维护与运行安全的重要工作。从现代水电站运行经验总结中可以看出,水轮机组的振动对水电站机组甚至厂房的安全、经济效益都有着重要的影响。对此,需要加强调查研究,在工程实践中不断创新。

1 水轮发电机组振动的危害

振动是旋转机械不可避免的现象,若能将其振幅限制在允许范围内,就能确保机组安全正常运行。但较大振动对机组安全是不利的,会造成如下危害:

a. 使机组各连接部件松动,使各转动部件与静止部件之间产生摩擦甚至扫膛而损坏;b. 引起零部件或焊缝的疲劳、形成并扩大裂缝甚至断裂;c. 尾水管低频压力脉动可使尾水管壁产生裂缝,当其频率与发电机或电力系统的自振频率接近时,将发生共振,引起机组出力大幅度波动,可能会造成机组从电力系统中解列,甚至危及厂房及水工建筑物。

2 振动的原因及特征分析

收稿日期:2013-10-23

水轮发电机组的振动问题与一般动力机械的振动有一定差异,除了机器本身转动或固定部分引起的振动外,尚需考虑发电机的电磁力以及作用于水轮机过流部分的流动压力对系统及其部件振动的影响。在机组运转的状态下,流体—机械—电磁三部分是相互影响的。例如,当水流流动激起机组转动部分振动时,在发电机转子与定子之间会导致气隙不对称变化,由此产生的磁拉力不平衡也会造成机组转动部分的振动,而转动部分的运动状态出现某些变化后,又会对水轮机的水流流场及发电机的磁场产生影响。因此,水轮机的振动是机械、水力、电气等多种原因引起的。

2.1 机械原因

水轮机和发电机两者结构所造成的机组机械振动多种多样,主要有:转子质量不平衡、机组轴线不正、导轴承缺陷或间隙调整不当、机组支撑结构或轴系刚性不足和轴密封调整不当等。

2.1.1 转动部分质量不平衡

水轮发电机组转动质量不平衡所产生的离心力造成机组振动最普遍的原因之一。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。轴变形越大,振动也越严重。其振动特性:振幅与机组出力无关,在空载下也振动;振幅随转速的增高而增大,且大致与转速的平

方成正比;径向振幅最大,轴向较小;振动频率为转频和倍频,其主频为转频率。

预防和处理措施:如果发生这样的情况,要进行转子的静平衡、动平衡试验,使不平衡重量尽可能小,从根本上消除这种振动的原因。对于高速、长转子机组应根据机组上下导轴承的摆度值,在转子的上部和(或)下部的不同方位配重。例如,广西龙滩水电站700 MW机组采取现场动平衡试验,消除了转动部分的质量不平衡,保证了机组的稳定运行。

2.1.2 轴线不正

由于转子、转轮几何中心偏离旋转中心,运行中会产生横向及纵向振动,直接形成回旋对推力轴承、导轴承均构成威胁,还能增大离心惯性力,两者都使振幅增大。从运行角度分析,一般出现在投运年限较长,各导轴承间隙大,没能及时修复,或者检修质量不良等情况下。另外一种就是摆振。在动水压力下,推力轴承处发生摆振。为此,在安装和检修时必须找正轴线,调整各导轴承的间隙在允许范围内。对新投产的机组,一般不会由于轴线不正而引起剧烈振动,但对于运行一段时间后的机组,由于某种原因使轴线改变,如推力头与轴配合不严密、卡环不均匀压缩、推力头与镜板间的垫变形或破坏等,都会引起机组振动。综上所述机组轴线不正包括:发电机上端轴和转子中心体不同心;转子中心体和发电机轴不同心;水轮机轴和发电机轴的轴心不成一条直线;转轴弯曲、偏心、或者轴线曲折;发电机定、转子不同心;推力轴承滑动面与转轴不垂直;水轮机上、下止漏环不同心等。2000年11月天桥水电站1号机大修后,发生发电机推力瓦12块被烧毁的严重事故,因推力瓦水平调整不好,轴系中心不正及调速系统失调所致。其振动特性:振幅与机组出力无关,在空载下也振动;振幅对转速不敏感,通常在60%~100%额定转速范围内的振幅都比较大;转轴的径向振动最为明显;振动频率为转频和倍转频,其主频为转频。

预防和处理措施:提高制造精度、制造质量,提高安装水平,消除机组轴线、发电机定转子、水轮机上下止漏环对中不良,轴线曲折、偏心,推力轴承垂直度不高等缺陷。

2.1.3 导轴承缺陷或间隙调整不当

导轴承由于设计缺陷在运行中松动,轴瓦间隙设计或调整不当,轴承支架刚度不当,轴承支架刚度不足,都会造成机组的振动、摆度增大。此时的振动主频为转频,且振动在空载、低转速下就会发生。例如:五强溪水电站水轮发电机轴颈直径在2 m以上,而三峡电站水轮机的轴颈直径达到4 m。安装调整时,轴承轴颈和轴瓦支架的温度是相同的,投入运行后,与热油直接接触的轴颈温度会明显高于轴承支架,两者的热膨胀胀量就会明显不同。为了使机组运行时轴承最为合理,设计上一一般会给出一个数值较大一些的冷态调整间隙。如果设计预测不准,冷态间隙给得过大或者过小,就可能造成轴承运行不良,引起机组振动。五强溪水电站初期运行时,水轮机导轴承就曾出现过这种情况,设计提供的冷态间隙过大,导轴承处的振动总是偏大。后来逐步减小了冷态间隙,导轴承处的振动值趋于正常。其振动特性:机组运行一段时间后,振动情况将发生变化;振动在空载、低转速下就会发生。

预防和处理措施:借鉴先行机组经验,选择合适的冷态间隙。

2.1.4 机组支撑结构或者轴系刚性不足

机组支撑结构的静刚度不足,在外力作用下会产生较大的变形,而动刚度不足,在不平衡力或力矩作用下会产生较大的振动。国内外不少水电站都曾发生过因为负荷机架、机座、铁芯、磁轭等刚度不足,使机组固有频率降低,从而引发机组振动的故障。刘家峡水电站10 MW发电机组投产不久,机组振动严重超标,其原因之一,上机架强度低,整体刚度差,机组后来返厂修理,对上机架的支臂进行了加固,以及更换更大直径的水轮机主轴以增加机组旋转部分的刚度,在一定程度上减小了机组的振动。其振动特性:振幅随转速升高而增大;振幅与刚度系数成反比;发电机定子振动较为明显;振动频率为发电机频率。

预防和处理措施:在设计上应该有足够的静、动刚度,以确保机组的稳定运行,切忌为节省材料、降低成本而减少机组的支撑结构的安全裕度。

2.1.5 轴密封调整不当

机组各处的轴承盖、轴瓦托架、水轮机的径向盘根密封,如果调整不当,四周紧量不均,或者水轮机径向润滑不良,则会造成转轴横断面四周受

热不均,热膨胀导致转轴弯曲,而发生严重振动。其振动特性是:振幅通常随转速的上升和出力的增加而增大;振动主频转为转频。

预防和处理措施:可采取无接触式的密封结构以及仔细安装调整,使密封四周间隙均匀措施。

2.2 水力原因

水力振动由水轮机水力部分的动水压力的干扰造成的振动叫水力振动。引起水力振动主要是水力不平衡,尾水管中的水力不稳定、涡列、偏离最优工况下运行等。

2.2.1 尾水管中水力不稳定

尾水管中水力不稳定现象,尾水管中水力不稳定现象,主要指尾水管中的水压周期性的变化,压力脉动作用于机组和基础上,就引起振动、噪声和出力波动,同时它对尾水管有相当大的破坏作用。这种情况一般发生在非设计工况下,水流在尾水管进口有一个圆周分量,形成旋流。当此分量达一定值时,便在尾水管中出现涡带,使尾水管的水流发生周期性的变化,引起水压脉动和管壁振动。当水轮机的自振频率与压力脉动频率相同时,便发生共振,威胁水轮机组的运行,岩滩水电站运行时机组强烈振动,电站下游副厂房的窗户玻璃也“沙沙”作响,就是尾水管涡带与尾水体发生共振所致。降低尾水管涡带措岩滩水轮机在导叶开度为 40%~45% 工况,尾水管涡带压力脉动幅值超过 20%,最大时达 36.9%~43.9%,频率为 0.208~1.808 倍转频。造成机组强烈振动,副厂房的窗户玻璃都发出“沙沙”的响声,是尾水管涡带与尾水管水体发生共振所致。

预防和处理措施:优化水力设计;机组运行中对涡带区进行适当补气,一般采用自然补气,必要时也可强迫补气。

2.2.2 卡门涡列

卡门涡列引起的振动。当水流流经非流线型障碍物时,在其后面尾流中分裂出一系列变态漩涡,即卡门涡列。这种涡列交替地作顺时针或反时针方向旋转。在其不断形成与消失过程中,会在垂直于主流方向引起交变的振动力。当卡门涡列的频率与叶片固有频率接近时,叶片动应力急剧增大,有时发出响声,甚至使叶片根部振裂。大朝山水轮机投运初期也因卡门涡造成了转轮叶片的严重裂纹;丹江口固定导叶后的卡们涡曾引起

导水机构明显振动,造成剪断销剪断、连杆销上爬;大朝山卡门涡共振时,水轮机室内最高噪声 113 dB。小浪底停机过程中,转速降到约 60%~40% 额定转速时,叶片高阶自振频率与叶片搅动水流所产生的卡们涡频率耦合,发出每转一次的刺耳噪声。

预防和处理措施:减薄叶片、固定导叶出水边的厚度,提高卡门涡频率,避开共振;设计时预测并错开卡门列涡和绕流部件频率。

2.2.3 过度过程中的不稳定现象

过渡过程不稳定现象有启动过程不稳定现象、停机过程不稳定现象、机组快速增加负荷过程中的不稳定现象、机组甩负荷过程中的不稳定现象。例如:水头变化很大的小浪底水电站,为适应如此大的水头变幅,水轮机水力设计上采取了厚大叶片头部,试运行的时候,经过数次启动,叶片出水边与上冠相交处产生严重裂纹,采取优化导叶开启规律、补入压缩空气等措施得以解决。小浪底水电站多泥沙,为延长叶片的使用寿命,出水边厚度达到 37 mm。机组停机中,当转速下降到额定转速的 60~20% 区域,叶片在水流中搅动产生涡,使叶片产生高频动应力,大轴每转动一圈,水轮机就发出一声刺耳的尖角。叶片出水边削薄到 7 mm 后,动应力大幅降低,异常噪声消失。机组快速增加负荷过程中也会产生不稳定现象,天荒坪水电站 2 号机组,当增加负荷的时候,机组发生抬机现象,造成机组有一定的损坏。

预防和处理措施:对于上述过渡过程问题必须予以更广泛的重视,确保水轮机组安全、稳定运行。

2.2.1 偏离最优工况

水轮机偏离最优工况时,会产生叶道涡,叶片进口的冲角增大。来流在设计水头以上是正冲角,脱流发生在上冠叶片进口的背面;来流在设计水头以下是负冲角,脱流发生在上冠叶片进口的正面。而叶道涡就起源于偏离最优工况后上冠进口处的脱流,从水轮机模型试验观察是从转轮叶片间流出来的。随着水轮机工况变化,当 2~3 个叶片间同时开始出现可见的涡流,则认为在该工况下发生了叶道涡。巴基斯坦一水电站水轮机在高水头运行时发生过强烈振动和裂纹由叶道涡引起。巴西有两个水电站的水轮机由 ALSTOM 公

司供货,投运不久转轮即产生裂纹,对真机和模型进行了补充试验后证实,低水头叶道涡引起了叶片上过大的动应力,使转轮裂纹生产。GE公司为龚嘴水电站改造的两台水轮机运行在部分负荷时,水轮机发生强烈的噪声,后采用取强补气的方法得以解决,经过模型试验复试后,认为这种噪声也可能来源于叶道涡。

预防和处理措施:从设计上优化水轮机水力设计,优化转轮叶型;为避开高水头叶道涡,水轮机最优水头应该尽可能接近最高水头;在水轮机顶盖上预留压缩空气补气,必要时补入压缩空气消除振动;机组避开机组的振动区,例如伊泰普水电站,即使被认为水轮机稳定性能较好,也规定了715 MW的水轮机可在60%~100%额定负荷范围内连续运行,30%~60%低负荷区以及空载到10%~30%额定负荷范围内的运行总时间均不能超过机组运行总时间的3%,原则上不允许在10%~30%额定负荷范围内运行,的确需要时,必须在导叶和转轮之间连续补入压缩空气才行。万家寨、二滩、隔河岩、三峡等水电站,在现场试验的基础上,划定了机组的安全运行范围;小浪底水电站则严格按照合同规定的正常运行范围内运行。这些水电站采取划分不同区域、避开振动区运行措施后,机组运行稳定,基本没有发生水轮机转轮裂纹和其他事故。

2.3 电气原因

造成机组运行不稳定的电气原因主要有发电机三相不对称运行、气隙不均、发电机突然短路、定子铁芯压装不紧等。

2.3.1 三相不对称运行

发电机在运行时不可避免地会存在三相负荷不对称的情况。此外,当发电机定子单向接地、两相间短路时也都会造成发电机定子三相负荷不对称现象。此时,发电机三相绕组中的不平衡电流,会在三相绕组中产生负序电流,引起负序旋转磁场。当负序磁场正对发电机纵轴时,由于气隙较小,因此定、转子间的作用力较大;反之,当负序磁场正对发电机横轴时,由于气隙较大,定、转子间的作用力较小。这样负序磁场使定转子间的作用力时大时小,从而造成定子机座和转子的振动。其振动特性:振幅随负荷增加而增大;定子铁芯的振动呈驻波式椭圆振动;振幅与负序电流成正比。

这样现象可以采取设置阻尼绕组减弱负序电流。当负序旋转磁场切割转子时,阻尼绕组因为电阻和漏电抗很小,又安装在极靴表面,将会产生较大的感应电流而显著地削弱负序磁场,从而减小负序电流;还有就是在电力系统的设计、运行上采取措施,减小负序电流。

预防和处理措施:发电机设置阻尼绕组减弱负序电流作用;在电力系统的设计、运行上采取措施,减少负序电流。

2.3.2 气隙不均

气隙不均一般有静态和动态。静态气隙不均:发电机定子或、转子不圆,或者定子、转子不同心,都可能造成发电机气隙不均匀。当发电机转子磁极固定良好、在运行中没有窜动时。最小气隙在空间的位置是固定的,此时的气隙不均匀即为静态气隙不均。它导致发电机气隙不均匀,在发电机定子上产生相对静止的单边磁拉力或周期性交变磁拉力,在发电机转子上产生周期性交变拉力,从而引起发电机振动。主要特征:振幅随励磁电流增大而增大,随发电机出力的增加而增大;振幅随气隙不均匀度的增大而增大;造成发电机导轴承过负荷,引起导轴承振动,并造成上机架振动。如铜街子1号发电机上导轴承经一段时间运行后,摆渡逐渐增大,危机机组运行。起初怀疑因轴线不良或者上导轴承调整不当,进行了多次检修,改进结构、精心调整,都没有取得效果。后通过仔细检查,发现主要原因是静态气隙不均匀,处理好气隙后,机组运行正常了。气隙不均有两种,如果发电机转子磁极在运行中松动,或其他原因造成气隙在运行中的不均匀,此时,气隙的位置是旋转的是动态气隙不均;与静态气隙不均基本相同,但转子上将产生转频振动是动态气隙不均。例如:加拿大的曼昆机组曾发生过动态气隙不均匀引起的机组振动,对磁极进行加固处理后消除了动态气隙不均匀,机组运行良好。

气隙不均处理措施:适当提高对定、转子圆度和同心度的要求;增加上机架径向支撑刚度;提高动平衡、静平衡精度;提高制造和安装的精度;避免发生发电机转子磁极在运行中的松动。

2.3.3 发电机突然短路

发电机出口突然短路会使定子绕组的端部受到很大的电磁力的作用。这些力包括定子绕组端

部相互间的作用、定子绕组端部与转子绕组端部相互间的作用力以及定子绕组端部与铁芯之间的作用力。另外,发电机突然短路还使转子轴受到很大的电磁力矩作用,所受力矩分为两种:一种是短路电流中使定子、转子绕组产生电阻损耗的有功电流分量所产生的阻力矩,另一种是突然短路过度过程中才出现的冲击交变力矩。这些电磁力及电磁力矩能使发电机组受到剧烈的振动,并给发电机部件带来危害。发电机转子两点接地当发电机在运行中出现转子两点接地时,部分线匝短路,电阻降低,有较大的短路电流流过短路点,励磁电流不正常的增大,发电机进相多,引起磁场不平衡,造成发电机组强烈的振动。此外,非同期并列、系统故障、雷击也会使发电机组产生电磁振动。例如:2001 年巴西 - 巴拉圭的 440 kV 线路发生短路,电网震荡造成伊泰普电站 18 台 700 MW 水轮发电机组中的 13 台因产生剧烈扭振而被迫停机,使巴西 - 巴拉圭两国大面积停电。其振动特性:突然发生;噪声变化剧烈;振动形式为扭振。

预防和处理措施:对各种异常情况下的网机关系进行分析,并进行网机耦合仿真计算,根据分析、计算结果采取必要措施。

2.3.4 定子铁芯装压不紧

如果发生发电机定子铁芯的压紧力不够足,运行一段时间后,在电磁力的作用下,就可能出现铁芯冲片松动。定子铁芯松动通常发生在铁芯齿部、端部和合缝处。如果在设计上,发电机铁芯和机座做不到热变形协调,即铁芯热膨胀受到定子机座的约束,则定子铁芯就会产生瓢曲,发电机运行时,在电磁力作用下,铁芯冲片的松动和铁芯瓢曲都可能导致发电机的振动、噪声和铁芯温度升高。国内外多个水电站都曾发生过发电机定子铁芯冲片松动及定子铁芯瓢曲现象,程度不同地引起发电机的振动、噪声还和铁芯温度的升高。漫

湾水电站发电机就曾经发生过,后来采取加大铁芯压力、重新压紧铁芯等措施,得以改善。其振动特性:振幅与励磁电流大小有关;伴随产生明显的电磁噪声;上机架振动比较明显。

预防和处理措施:提高定子铁芯的整体性和刚度;综合考虑发电机的定子铁芯结构、铁芯长度以及电机运行后,由于各种因素引起的定子铁芯收缩等因素,合理选择定子铁芯压紧力;铁芯堆叠时,采用分段热压,保证加热温度、加热时间和压紧力;定子铁芯和定子机座间可以采用浮动式径向连接结构,避免机组运行时两者的热膨胀差造成铁芯瓢曲。

3 结 语

水轮发电机组运行时,必然会产生振动,在掌握各种振动特征的基础上,针对机组的实际振动状态,科学的方法,逐一排除疑点,缩小故障原因的范围,以期待尽快得到正确的诊断结果,尽早处理,防止故障的进一步扩大,避免重大事故的发生,保障水轮机的安全、稳定运行。

参考文献:

- [1] 张海洋,陈丽蓉.水轮机组异常震动原因分析[J].电力信息科技,2009,12.
- [2] 黄源芳,刘光宁,樊世英.原型水轮机运行研究.中国电力出版社,2010.4
- [3] 刘国梁.水轮机异常震动故障的排除[J].中国电力资讯,2009,11.
- [4] 张晓龙.常见水轮机异常震动特点分析及其故障排除[J].水电信息科技,2010,4.
- [5] 樊世英.混流式水轮机转轮裂纹原因分析及预防措施[J].水力发电,2002.(5).
- [6] 唐博进,吴穹,杜建国等.大型水轮发电机定子绕组谐波及其力波分析[J].大电机技术,2011(5)
- [7] 贺建华,陈昌林,铎林等.三峡右岸 15-18 号发电机振动及噪声优化改进[J].大电机技术,2010(1)

作者简介:

刘元秀(1964-),女,四川乐至人,高级工程师,从事水力发电开发科技信息管理工作。(责任编辑:卓政昌)

大岗山坝基帷幕灌浆及泄洪洞相关技术专题咨询会议在工地召开

受国电大渡河流域水电开发公司的委托,中国水利水电建设工程咨询有限公司于 2013 年 11 月 24 日至 25 日,在工地现场主持召开了大岗山水电站施工阶段 2013 年坝基帷幕灌浆及泄洪洞相关技术专题咨询会议。会议期间,与会专家和代表查勘了左岸高线混凝土系统平台、左岸 1135 平台、地下厂房、泄洪洞等部位。会议听取了大岗山公司、成都院等参建单位对本次咨询议题及有关建设情况的介绍,重点对坝基三角区帷幕灌浆处理措施、泄洪洞出口挑坎裂缝成因及处理措施、导流底孔提前封堵方案、下游防冲护岸工程施工等问题进行了认真分析讨论,并提出了咨询意见。参建各方认为,本次会议提出的咨询意见切实可行,有利于顺利开展下步的施工工作。会议达到了预期的效果。