

CCS 水电站尾水洞有压工况下 提高水轮机发电保证率措施研究

乔中军

(工程总承包事业部)

[摘要] 厄瓜多尔 CCS 水电站 8 台冲击式水轮机存在尾水洞有压工况运行模式,经对水轮机机坑内气泡的形成过程进行模拟研究,结合水轮机模型试验观察和分析压气工况时水流的速度、气泡的大小和气泡的聚集形态,找出影响水轮机安全稳定运行的因素,提出采取的措施:在尾水洞下游侧设自然补气和强迫补气系统,将水面降低到一定水位,形成必须的通气高度,解决了冲击式水轮机在尾水洞有压工况下安全稳定运行的问题,具有较高的技术创新性和巨大的经济效益,为国家电网骨干电站复杂工况水轮机安全稳定运行提供了保证。

[关键词] 尾水洞 冲击式水轮机 水轮机模型试验 压气系统安全稳定运行

1 概述

厄瓜多尔科卡科多辛克雷(Coca Codo Sinclair, 简称 CCS)水电站位于亚马逊河二级支可卡河上,距离首都基多 130 km,地下厂房内安装 8 台冲击式水轮发电机组,总装机容量 1500 MW,是该国战略性能源工程,也是目前世界上规模最大的冲击式机组的水电站。电站年均发电量约 87 亿 kW·h,建成后将满足厄瓜多尔全国三分之一人口的电力需求,结束该国进口电力的历史。该电站也是中国公司在海外独立承担设计的规模最大的水电工程之一。

CCS 水电站由首部枢纽、引水隧洞、调蓄水库及地下厂房等组成。本工程概念设计(相当于国内的可行性研究阶段)为意大利 ELC 公司完成,对概念设计进行复核时发现:正常工况下尾水洞是无压洞,当在较大洪水条件下(流量大于 1600 m³/s),下游河道水位抬高将导致 8 条尾水洞水位上升,尾水洞成为有压运行模式,会导致转轮室压力降低,涌浪出现,水轮机效率严重下降,导致机组不能正常运行,这是概念设计及主合同均没有提及的一种特殊工况。

在基本设计阶段,考虑尾水洞出口地质条件等因素,决定将尾水洞出口位置下移 400 m 左右,使得

情况有所缓解,尾水洞成为有压洞的洪水流量由 1600 m³/s 提高到 2800 m³/s,根据水文专业的计算,电站平均每年有半个月左右时间出现较大洪水条件(大于 2800 m³/s),但也无法避免对水轮机造成的短时停机影响,作为国家的骨干电站,一旦停机对国家电网冲击较大。

为避免这个工况出现及不影响发电水头,曾提出过抬高水轮机安装高程(4 m)并相应抬高调蓄水库高程(提高上游水位)方案,但因投资大、实施工程困难大等等因素而搁浅。经与世界上著名水轮机厂家充分交流的基础上,提出在尾水洞下游侧设自然补气系统和强迫补气系统,其中强迫补气系统将水面降低至一定水位,形成必须的通气高度,解决了冲击式水轮机在尾水洞有压工况下安全稳定运行的难题。自然补气系统和强迫补气系统已在 2012 年 5 月瑞士洛桑水轮机模型试验得到验证,为后期项目实施提供了可靠的依据及技术支撑。

CCS 水电站 8 台机组于 2016 年 11 月全部投产发电至今,水轮机运行稳定,效率较高,完全满足合同要求,已产生巨大的经济效益。

2 研究内容

冲击式水轮机一般为了获得最大可能的工作水头,使转轮尽量布置在靠近最高尾水位的地方,避开

作者简介:乔中军(1962—),男,河南省焦作人,教授级高工,从事水力机械设计与研究工作。

机组变负荷时的尾水洞内的涌浪、保证通风、避免转动的转轮与尾水顶部的泡沫接触而引起效率损失,转轮与最高尾水位之间需要有一个最小距离,即水轮机排出高度。与反击式水轮机相比,这部分水头未能被利用,因此也称为“水头丢失”。当水轮机正常运行后的水流离开水斗落入尾水坑的过程中会大量掺气,因而将空气带走,若尾水洞(渠)通气高度不够,从水中分离出来的空气不能全部返回机壳,使机壳内出现真空,则会造成水轮发电机组效率下降和机组振动加剧。为了避免机壳内出现不良的条件,必须采取补气的方法将机壳内的压力与大气应力进行平衡。

冲击式水轮机在尾水洞有压运行工况下运行,目前国内还没有先例,世界上仅有少数几个电站存在这种工况(详见表 1),但少数几个电站的工况是下游河道水位常年一直高于尾水洞水位,不存在工况转化问题(详见图 1)。但 CCS 的 8 台水轮机绝大多数时间是正常的运行工况,只有在大洪水条件下,尾水洞才成为有压洞,所以其运行工况、边界条件、机组结构形式与少数几个电站均存在较大的差异。

目前这少数几个电站均是采取强迫补气压水措施,将尾水洞水位降低到能保证水轮机安全运行的高度,使得转轮能在空气中运转,确保水轮机安全稳定的运行。

表 1 冲击式水轮机尾水洞有压运行电站实例

电站名称	机组台数	单机容量(MW)	单机流量(m^3/s)	最高尾水(高于尾水洞水位)	备注
Kopswerk II	3	179	25.1	19.17	一直需要空压机投入压气运行
Tesla	1	26.5	5.6	3.5	一直需要空压机投入压气运行
Tysso II	2	109	17.5	17	一直需要空压机投入压气运行
CCS	8	184.5	34.7	4	大部分时间不需要空压机投入运行

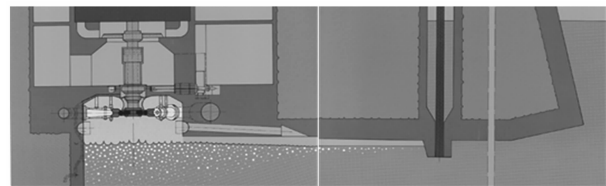


图 1 尾水洞有压工况下运行示意图

3 系统设计

3.1 补气系统概述

冲击式水轮机的补气系统可分为两个独立的过程:气泡的形成过程和空气回收过程。其中泡沫的形成过程为复杂的两相流问题,目前研究得还不够深入,重要参数的研究才刚刚起步。因此,这里以水轮机模型试验为依据,并结合少量已运行的类似电站对空气回收系统进行分析研究。

3.2 空气回收系统

当下游河道水位正常时,气泡被尾水洞(渠)的水流带入下游河道中。为了减小这部分空气的损失量,弥补机壳内的气压损失,有必要设置空气回收系统,尤其是当气泡分布峰荷正好在水轮机机坑出口处高程时,空气的损失量更大,空气回收系统的设置显得更加重要。

(1) 自然补气系统

尾水洞在无压状态下,为了解决水轮机工作水

头与能量效率以及安全稳定运行之间的矛盾,在尾水洞内设置自然补气管,利用尾水洞内的压差,能自动把落入尾水坑过程中水流中掺入的空气通过补气管道再送回机壳内,从而破坏机壳出现的真空,维持机组效率,减少机组振动,为了保证水轮机机壳内的最优补气,补入的空气应从水轮机机壳的中心部位补入,空气的大部分应能直接补入机壳中。因此有必要对水斗式水轮机无压工况运行时自然补气系统进行分析研究。

(2) 空气回收系统

冲击式水轮机尾水气体含量随着出力的增大而增加,因为更多的水从斗叶甩出会产生更多的泡沫,挤压了气泡的间距。由于尾水洞(渠)进口处水流高度紊动,气泡不会合并。另外,由于气体在尾水渠的垂直方向分布非常不均匀,如图 2 和图 3 所示,集群气泡的逸出速度在渠道的进口和接近表面处分布必然会最小。为了有效的利用尾水洞内的空气,需要在合适的位置设置一个挡气坎用于空气回收。

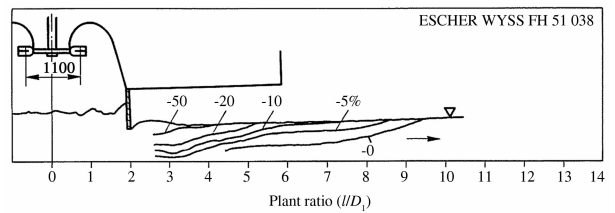


图 2 冲击式水轮机在 35% 负荷时在尾水渠中自由气泡的比例

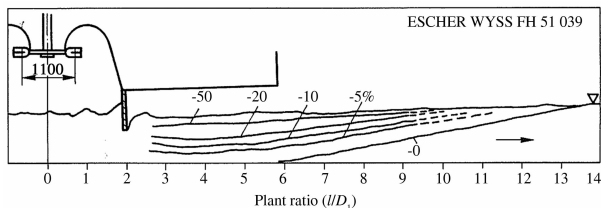


图3 冲击式水轮机在100%负荷时在尾水渠中自由气泡的比例

从图4、图5中,我们可以看出,在约14倍转轮直径的尾水洞(渠)处,自由气泡的比例达到100%。

4 补气系统的水轮机模型试验

2012年5月21日至5月25日,在瑞士的洛桑安德里茨水力实验室进行了水轮机模型验收试验。该试验台配有高精度的测量设备,其中流量测量误差为 $\pm 0.162\%$,水力比能测量误差为 $\pm 0.112\%$,力矩测量误差为 $\pm 0.100\%$,转速测量误差为 $\pm 0.050\%$,模型效率误差为 $\pm 0.232\%$,综合效率误差为 $\pm 0.246\%$,满足IEC有关要求。

模型试验台的主要参数:最高水头320 m,最大流量 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$,最大功率940 kW。模型水轮机的主要参数:转轮节圆直径361.5 mm,斗叶宽度90.1 mm,喷嘴直径35.8 mm,水斗数22,原模型比尺为9.2647:1。根据合同要求对水轮机进行了效率试验、出力试验、飞逸试验、自然补气和强迫补气试验、折向器推力测量试验以及模型尺寸检查等试验。

针对CCS存在的压气运行工况(尾水洞有压工况),对试验台尾水渠及末端进行改造,在整个尾水段装设有观察口(透明玻璃),尾水出口安装了档气坎及一个高位水箱(涌高水位),对整个水流流态进行了模拟,并进行了自然补气和强迫补气试验。根据相似定律确定了水轮机流道并设置了相应的自然补气系统和强迫压气系统,在模型试验台上,进行了额定净水头为604.10 m,额定出力为188.266 MW时各种工况的模拟,记录了在尾水流道鼻端后水位不同时,水轮机效率、气流量和气压的变化情况,并通过原模型效率、气流量和气压的换算,得到原型水轮机的补气试验参数特性,补气试验参数见图4。

在自然补气试验中,通过图4中蓝色实线可以发现,在鼻端尾水位高于607.80 m时,水轮机效率随尾水位的抬高下降得非常快,而在低于607.80 m时,水轮机的效率几乎不随尾水位的变化而变化,在尾水位达到607.30 m时水轮机的效率应不受尾水

位的影响,很显然自然补气试验的结果是满足要求的。在强迫补气试验中,一是要检验压缩空气对水轮机效率的影响程度,二是要验证在尾水位变化时所选用的空压机容量是否能够满足压气要求。通过图11可以发现,在尾水位不断升高,甚至达到609.60 m这样一个极端尾水位时,在保证进入机壳内的气压(红色点划线)及空压机排气量(红色虚线)的前提下,水轮机效率(双点划线)受尾水位的影响极小。当然,随着机壳内气压的增大,机壳内的空气密度也在增大,这就导致了转轮的风损增大,水轮机的效率有微弱地下降,也证明了强迫压气及补气系统设计合理、可靠,档气坎位置选择正确。

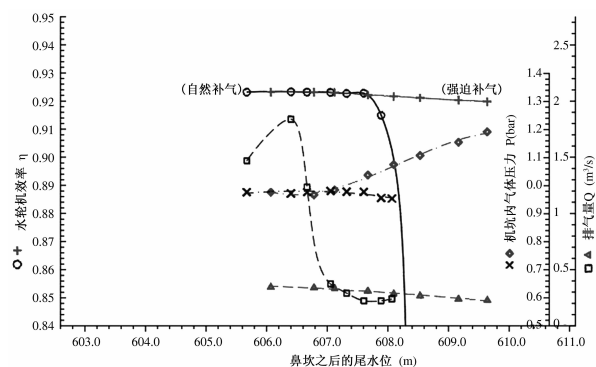


图4 原型水轮机补气试验结果

5 工程应用

CCS水电站冲击式水轮机的排出高度为3.8 m,尾水支洞通气高度1 m,尾水洞水位允许的最高运行水位为607.3 m,如水位超过这个水位,需要投入压缩空气,将水位压到607.3 m以下,水轮机才能运行。水轮机压气系统由供气系统和空气回收系统组成,通常包括注入机壳的压缩空气和对应设置在尾水支洞内的挡气坎来回收空气。

5.1 空气回收系统

CCS水电站采用从机壳到尾水洞的埋管,埋管离机壳有足够的距离。管道的供气量为水轮机最大流量的20%到30%,进入机壳内的气流速度不宜太大,空气流速控制在20~30 m/s,每个喷嘴设置独立的管道系统,自然补气系统共布置8根补气管路,其中15%的气量从2根口径DN250管路为中心体补气,空气口的位置位于尾水洞的进口处以及距离水轮机中心线52 m处;85%的气量从6根口径DN350管路为机壳内补气,空气口的位置位于尾水洞的进口处以及距离水轮机中心线20 m的鼻端处,

分散在不同的角度。自然补气的管路布置见图5。

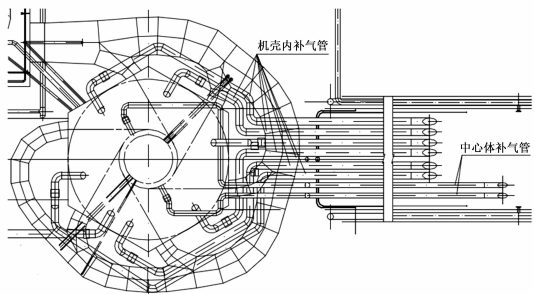


图5 自然补气管路平面布置图

5.2 压气运行系统

5.2.1 压气系统

在压气运行系统中,供气系统和空气回收系统之间达到经济最优组合非常重要。目前从很少的一些已建电站或模型试验中获得一些资料。CCS水电站供气系统在608.0 m高程设置了两台75 kW鼓风机(一主一备)用于向水轮机机壳内注入压缩空气,压气系统图详见图6。

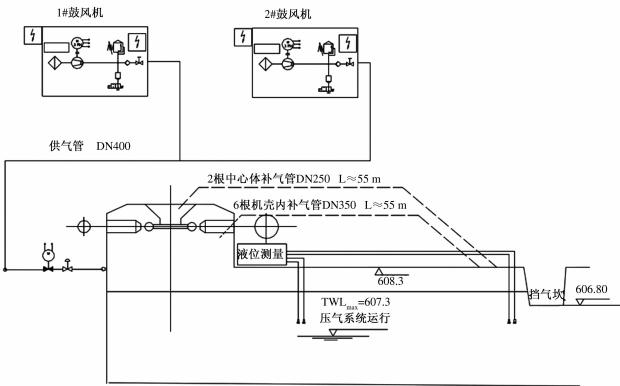


图6 压缩气系统图

根据计算,CCS水电站在尾水支洞离机组中心线约56 m处自由气泡达到100%,因此,参考类似电站的运行经验,在距机组中心线50 m的位置设置一个挡气坎用于回收尾水支洞内的气体。

5.2.2 压气系统管路计算

由于空压机的气量偏小,一根管子就能够满足要求。根据模型试验结果,为了确保足够的补气量,空压机所连接的管路确定为400 mm。在模型水轮机中,管路的位置背对尾水洞,以确保有足够的压力进入机壳内。在原型水轮机中,位置和模型水轮机保持一致。

5.2.3 压气系统的自动控制

在每条尾水支洞内前后两个断面各设置了2个微压传感器,共4个微压传感器,通过压差计算出尾水支洞内的水位,用于控制2台鼓风机启停,具体布置见图7。

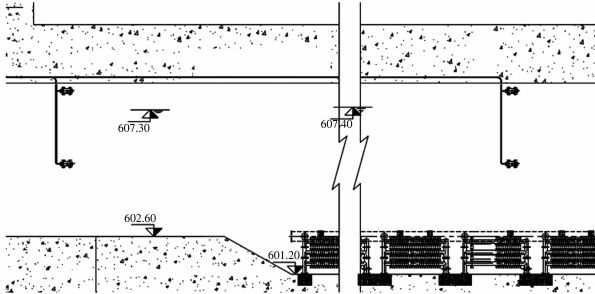


图7 尾水支洞水位计布置图

5.2.4 压气系统设备参数

当尾水洞处于有压状态,需投入压气运行系统进行强迫压气,经过上述选型计算,压气运行系统所需设备主要参数见表2:

表2 压气运行系统主要设备参数表

序号	名称	规格	单位	数量	备注
1	鼓风机	$Q = 3600\text{ m}^3/\text{h}$, $N = 75\text{ kW}$	台	16	每台机组设置2台
2	微压传感器	测量范围:0 ~ 50 kPa,输出:DC4 ~ 20 mA	个	32	每台机组设置4个

6 结论

通过上述分析及模型试验研究成果,为今后国内外冲击式水轮机在尾水有压工况安全稳定运行奠定了基础、积累宝贵的经验。确保了CCS水电站8台水轮机在发生较大洪水条件下能安全稳定运行,确保了国家的电网安全与稳定。根据水文专业的计

算,每年按15天考虑,每天按20小时计算,由此每年可以多发电45000万kW·h。

由于CCS水电站8台机组至2016年11月投运以来,现场还没有发生大洪水的条件,现场配置的压气系统还没有投入运用,但已做好调试运行工作,随时可以投入运行。