

# 冶勒水电站水轮发电机组充水调试与试运行

范方武, 覃国茂

(中国水利水电第七工程局机电安装分局 四川 彭山 620860)

**摘要** 简介冶勒水电站概况,叙述设备启动试运行应具备的条件。分引水隧洞充水、压力管道充水和配水环管充水 3 个步骤详细阐述充水试验过程。水轮机组安装完成后,进行发电机组空载试验和机组负载试验与试运行。介绍手动开停机试验、机组动平衡试验、发电机升压升流试验、机组并列试验、机组带负荷试验、机组甩负荷试验和试运行等一系列试验,试验中总结出一套有效的调试规程、方法和技术参数。试验结果表明,机组各轴承瓦温、振动、摆度均符合生产厂家标准和我国国家标准。

**关键词** 冶勒水电站;冲击式水轮发电机;充水调试;机组试运行

中图分类号:TM306 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2006)S2-0045-05

冶勒水电站工程由首部枢纽、引水系统和地下厂房三大部分组成。首部枢纽由沥青混凝土心墙堆石坝及进水口建筑物组成,包括拦污栅段和渐变段。引水系统由引水隧洞、调压井和压力管道组成,引水隧洞包括进水口、闸门竖井、有压引水隧洞、集石坑。闸门竖井内设置平板工作闸门和平板检修闸门各 1 道。在引水隧洞的末段设有双室式调压室,上下室连接竖井直径 4 m,最大高度 85 m。调压室后设蝶阀室,蝶阀室装有 1 只 DN3400(型号 PDF82-WY-340)卧轴双平板蝶阀。蝶阀与压力钢管主管直径均为 3.4 m,压力管道长 1 768.8 m。压力管道由上水平段、上斜井段、中水平段、中斜井段、下水平段、下斜井段组成。压力钢管在地下厂房前分叉,经过 2 台 QF740-WY-170 球阀至 2 台机组,球阀公称直径 1.7 m,设计压力 7.4 MPa,操作机构为双缸摇摆式接力器,操作油压为 6.0 MPa。地下厂房内设置 2 台由法国 ALSTOM 公司生产的单机 120 MW 的 6 喷嘴、21 个斗叶的冲击式水轮发电机组,水轮机单机最大出力 136 MW,额定转速 375 r/min,设计水头 580 m。电站每台机配 1 台型号为 NEYRPIE® 1500 的数字式调速器和 1 台油压装置。发电机出口电压 13.8 kV,从下游侧自出线母线洞引至洞外变电站,220 kV 侧 2 回出线经 2 台变压器 SFP9-H-150000/220 向系统送电。电站发电机与变压器采用单元接线方式,在发电机出口装设断路器。冶勒水电站冲击式机组尾水

系统全部为无压流,布置相对较简单,厂房尾水由 2 条尾水支洞经 2 扇闸门后汇流成尾水主洞,主洞长 287.15 m,主洞出口后接尾水明渠。

## 1 设备启动试运行应具备的条件

设备启动试运行应具备的条件如下:①整个机组的安装工作已完成。②调速器设备安装完毕。③气系统设备已安装完成并调试完毕。④压油装置已安装完成,压油装置到机组折向器和喷针的油管已安装完成并清扫干净。⑤球阀安装完毕,水、油管已清扫干净。⑥机组的各个传感器,电机和启动器以及它们的控制屏的电源线和控制线已安装并检查完毕。⑦交流和直流电源可以为机组的任何一个传感器、电机和启动器以及机组辅助设备正常供电。⑧调速器控制屏电缆安装完毕并供电。⑨冷却水系统安装调试完成。⑩厂用电系统安装调试完成并检查完毕并处于带电运行状态。⑪渗漏排水系统安装调试完成并检查完毕。⑫机组控制与保护系统设备安装调试完成并检查完毕。⑬操作电源系统设备安装调试完成、检查完毕并处于带电运行状态。⑭电站计算机监控系统设备安装调试完成、检查完毕并处于带电状态。⑮主变压器、母线设备安装调试完成并检查完毕。⑯由于冲击式机组的喷针出水部位尺寸不大,喷嘴出口直径为 283 mm,如果有土建杂质或其他大的异物进入配水环管,很容易损害喷针

及其操作系统。因此在充水之前必须对整个过水流程道进行详细的检查。在完成对压力管道和引水隧洞的检查后,方可进行引水隧洞的充水,然后进行压力管道的充水。⑰在引水隧洞、压力管道和配水环管充水试验之前,应确保各闸门和蝶阀、球阀等的工作状态正常,并逐一检查。发电单元完成无水联合调试、公用设备完成分项联合调试后,如各部按照规程验收合格,机组即具备进行充水启动调试与电站接入系统调试的条件。

## 2 试验方案

根据试验性质,将机组调试划分为充水试验、机组空载试验、机组负载试验与试运行3个阶段。

### 2.1 充水试验

冲击式机组的运行尾水位很低,冶勒水电站在机组没有启动的时候尾水位没有水,在2台机组启动的时候尾水设计水位低于转轮中心约3.8m,冲击式机组的转轮在喷嘴、折向器动作后是在空气中旋转的。充水程序包括引水隧洞充水、压力管道充水和配水环管充水3个步骤。

a. 引水隧洞充水。由于冶勒水电站为南垭河流域的龙头电站,水头高,对引水系统的充水应谨慎地进行。引水隧道充水前,应再次确认蝶阀和2台机组进口球阀及其旁通阀处于关闭状态并锁定。确认调速器、喷针处于关闭状态。确保与充水有关的各部照明充足、照明备用电源可靠、通讯联络设施完备。充水时,打开检修闸门充水阀,观察检修闸门和工作闸门间的水位上升情况,观察工作闸门下游侧的漏水情况,平压后提起检修闸门,投入检修门锁锭,完备安全措施。缓慢提升工作闸门约100mm开始向蝶阀前压力隧道充水,当引水隧洞充满后,提升工作闸门,保压5~6h并监视各部位是否正常。

b. 压力管道充水。由于压力管道长而且水头高,整个压力管道充水分6步进行。打开蝶阀旁通阀,向机组球阀前的压力钢管充水,根据水压判断充水的进展,注意监视水压和球阀漏水情况。在对压力管道充水的初期,打开位于球阀上游侧的压力管道放水阀,冲刷整个过水流程道,防止大的杂物留在引水通道中。每充一段监测5~6h。待充水平压后,关闭旁通阀,在静水中启闭蝶阀3次,并记录启闭时间,确认蝶阀动作及信号正确无误后关闭蝶阀,投入锁锭,旁通阀打开准备对配水环管充水。充水过程中不断监测球阀的漏水情况。

c. 配水环管充水。整个引水流道充满后即可开始对配水环管进行充水,充水还是采用球阀旁通

阀进行,对配水环管充水必须仔细谨慎地进行,防止喷针误动作引起机组转机,因此对配水环管的充水之前必须采取必要的安全防护措施,包括关闭喷针并使喷针动作的油压处于工作状态,同时关闭折向器。配水环管充水过程中要打开位于球阀下游伸缩节上的排气阀,待配水环管内的空气排放完后再关闭排气阀,否则会引起剧烈的振动。待充水平压后,现地操作球阀在静水中启闭3次,记录启闭时间,确认球阀动作及信号正确无误后,再确认远方关闭球阀和紧急关闭球阀动作及信号是否正确无误。

各部位充水过程中,应随时检查各结合面、测压系统管路、蝶阀进入门、蝶阀及球阀伸缩节等处的漏水情况,记录测压表的读数,确保厂房安全,发现漏水等异常现象时应立即停止充水并进行处理,必要时将其排空处理。各部位充水完成并经检查一切正常后,提起进水口工作闸门,投入锁锭,完备安全措施。打开压力钢管蝶阀,投入锁锭,完备安全措施。

### 2.2 机组空载试验

#### 2.2.1 机组首次手动开停机试验

冶勒水电站冲击式机组发电机为悬吊式结构,推力轴承采用高压油顶起装置。根据厂家要求在机组启动之前首先自行启动高压油顶起装置,待机组开机转速达到额定转速的80%后自动停止高压油顶起装置,机组由开机状态进入停机状态,当转速低于额定转速的80%时高压油顶起装置自动启动。由于高压油顶起装置的存在,使得机组在每次长时间停顿后不需要通过顶起系统进行顶转子。

机组第一次启动的时候,手动开启机组进水口球阀,然后手动启动高压油顶起装置,缓慢打开调速器的开度限制机构,待机组开始转动后,将喷针关闭,并记录机组启动开度。由各部观察人员检查和确认机组转动和静止部件之间无摩擦和碰撞情况。确认各部正常后,再次手动启动机组,测量记录机组运行摆度和各部位振动。转速升至50%的额定转速时观察各部运行情况。无异常后,转速升至额定转速值,机组空载运行,在转速上升至额定转速的80%时手动停止高压油顶起装置。机组达到额定转速时,校验电气表的指示是否正确,并记录当前水头下的空载开度。在机组升速过程中,要加强对各部轴承温度的监视,观察是否有急剧升高或下降现象。

将机组在空转情况下运行至少6h,检查温度是否稳定,测量其稳定的最大值。机组刚启动时每隔3min记录一次温度,随后可以延长至10min。试验过程中要密切注意温度的升高及各轴承的振动和摆度。冶勒水电站最终的运行情况是推力瓦温运行最高温度64℃,上导轴承最高温度51℃,下导最高温

度为 42℃,水导最高温度 65.2℃,满足机组长期稳定安全运行的要求。

在机组稳定运行至各部瓦温稳定后,手动停机。机组手动停机后,检查各转动部位与固定部位的间隙情况(轴承盖等)、各部位油槽油面的变化情况以及转动部分的焊缝是否有开裂现象等。

### 2.2.2 机组动平衡试验

冶勒水电站转子采用现场组装的方式,现场组装的时候由于没有进行转子铁片、磁极等的配重,因此在机组启动正常后首先进行机组动平衡试验。动平衡试验时,ALSTOM 公司采用加速度测振的方法进行上导、推力的振动测量,采用涡流测摆的方式进行下机架的摆度测量。根据这些测量数据,通过厂家专门的设计软件分析转动部分的动平衡情况,确定转子的配重量与部位。根据对 1 号机组第一次进入 72h 后轴电流停机事故的分析,由于监测信号不足,机组动平衡试验不完全,导致机组振动摆度增加,最终致使上导轴承瓦绝缘损坏,产生轴电流而停机。后来,四川电力试验研究所单独安装了监测上导、下导、水导振动与摆度的涡流传感器,与 ALSTOM 公司相比增加了水导的振动摆度测量,重新对机组进行了动平衡试验复核,发现动平衡超标,重新进行配重(21 kg),最终解决了 1 号机组的振动摆度问题。配重后机组振动摆度符合国家及 ALSTOM 厂家标准。

### 2.2.3 机组空载运行下调速器试验

在机组启动前应进行接力器和折向器的动作试验,在油压尽可能的小的情况下沿着接力器方向任意地移动接力器。喷针和折向器关闭,将油压增加到约为额定压力的 1/10 时逐个试验喷针,分别执行喷针开启和关闭指令,测量接力器的冲击时间。对折向器进行相同的检测。在额定压力下将喷针悬在空中测量喷针的关闭和开启时间。如果有要求,重新调节隔板,记录接力器油压/接力器冲击时间。折向器试验与之相同。从关闭位置开始一步步打开喷针,每一次打开 10% 直到它完全开启,每一步都要测量接力器的冲击时间和调速器指针的开启参数,记录接力器对调速器参数的比值。检查机组在空载运行下调速器的测频信号,应确保波形正确,幅值符合要求。扰动量一般为  $\pm 8\%$ 。转速最大超调量不超过转速扰动量的 30%,超调次数不超过 2 次。

### 2.2.4 机组过速试验

动平衡试验完成后,进行机组的过速试验。在测速齿盘上有一个离心摆,根据设计要求,离心摆与机械过速保护装置之间保留 1.5 mm 的间隙,原理是当机组过速时(即转速为 420 r/min 时),离心摆动作

触碰机械过速装置,使机械过速装置动作,进而电磁液压控制阀动作,该电磁液压阀控制着折向器动作,直接偏开机组的供水,使机组转速不再升高,然后喷嘴喷针缓慢关闭,避免压力管道内水锤压力上升过快造成损坏。如果机组转速未达到 420 r/min 就由于离心摆动作致使机组停机,则需要将离心摆拆卸下来对离心摆内部的弹簧进行压缩,反之,则轻微释放离心摆内部弹簧。

将测速装置各过速保护触点从水机保护回路中断开。以手动方式使机组达到额定转速,待机组运转正常后,将开度限制机构的开度继续加大,使转速达到额定转速的 112%,监视测速装置触点的动作情况、电气与机械过速保护装置的動作情况。在试验过程中密切监视并记录各部位的摆度和振动值,记录各部轴承的温升情况,监视是否有异常响声。

过速试验结束后手动停机,调速器全关和球阀全关并均投入锁锭装置,关闭其控制油路,全面检查发电机转动部分有无松动或移位;检查发电机定子基础及上机架基础有无松动;监视各转动部位与固定部位的间隙情况(轴承盖等);检查各部位油槽油面的变化情况。恢复过速信号的接点,必要时调整过速保护装置。

冲击式机组过速时由于折向器的动作很快,转速上升的幅度相对不大,根据厂家的试验数据,冶勒水电站的过速转速为额定转速的 112%,即 420 r/min。经过试验可知,在满负荷、额定水头下,折向器动作停机监测到的转速上升最大仅为额定转速的 106%。

### 2.2.5 无励磁自动开停机试验

无励磁自动开停机试验在机旁和中控室分别进行,进行机组自动开停机试验前,各部设备均置自动状态,检查开机条件是否已具备。

自动开机,记录并检查下列各项:①执行 PLC 空转程序;②检查机组自动开停机流程是否正确,检查技术供水等辅助设备的投入情况;③检查调速器和球阀的工作情况;④记录发出开机令至机组开始转动所需的时间,为 4 min;⑤检查测速装置的转速触点动作是否正确。

自动停机,记录并检查下列各项:①停机程序是否正确;②记录发出停机令至机组转速降至电气制动投入转速所需时间,为 15 min,转速降到风闸制动投入后机组停止的时间,为 2 min;③检查风闸制动器自动投入是否正确;④检查测速装置转速触点动作是否正确。

### 2.2.6 水轮发电机升流试验

设置发电机的三相短路点。此前已将主变低压

侧连线打开,在主变低压侧的出口隔离开关前设置三相短路线,将机组水机保护投入。手动开机至额定转速,确保发电机各部位温度稳定、运转正常。手动合 400 V 至励磁功率柜电源,合灭磁开关。通过励磁装置手动升流,当发电机电流升至 100 A 左右时停止升流。检查发电机中性点至主变低压侧的电流互感器所有电流回路,发现电流均正常,无开路现象。检查电流回路的正确性和对称性,继续升流至 400 A 左右时进行电流回路的极性和相位的检查。

在发电机额定电流 6 275 A 下检查机组振动与摆度,在碳刷及集电环工作情况正常后,每隔 10% 定子额定电流记录定子电流与转子电流,录制发电机三相短路特性曲线(定子电流和转子电流的关系曲线)。电流回路检查完毕后将发电机电流降至零,从零开始每隔 10% 升流至发电机额定电流,记录发电机电流及对应的转子电流、转子电压,测量转子轴电压,绘制发电机短路特性曲线,升至发电机额定电流下手动跳开灭磁开关,校验灭磁情况是否正常。同时用示波器录制额定电流下的灭磁过程。

### 2.2.7 水轮发电机升压试验

发电机升压试验前应具备的条件为:①发电机保护系统投入,励磁及调节器回路电源投入,辅助设备及信号回路电源投入;②发电机振动、摆度监测装置投入;③断开出口断路器,断开隔离开关,对发电机进行零起升压。

自动开机后机组各运行情况应正常。当发电机电压升至 10% ~ 20% 额定电压时,检查发电机出口 3 组电压互感器电压是否正常,检查所到屏柜的电压是否正确。二次电压检查后将发电机电压升至 50% 额定电压,跳开灭磁开关检查灭磁情况,将发电机电压逐渐升至额定电压,其间,观察一次部分有无异常,当电压升至额定电压后再检查二次各部电压是否正常,同时检查二次相序,相序应为正相序,测量机组振动与摆度,测量发电机轴电压,在额定电压下跳开灭磁开关,检查灭磁情况。录制发电机空载特性。发电机电压由零逐步升至对应于额定励磁电流下的电压值(13.8 kV)。升压过程中记录发电机电压及对应的转子电流、转子电压。绘制发电机空载特性曲线。对发电机组进行发电机单相接地试验,按照规程进行保护检查和试验。

### 2.2.8 励磁装置调整试验

励磁装置调整试验步骤如下:

a. 准备工作。①拆除厂用变电源,恢复励磁接线;②发电机保护系统投入,励磁及调节器回路电源投入,辅助设备及信号回路电源投入;③发电机振动、摆度监测装置投入;④断开出口断路器和隔离开关。

b. 进行手动给定、自动给定、远方给定试验。在发电机额定转速下检查励磁调节系统的电压调整范围(应在发电机空载励磁电压的 20% 到 110% 之间),测量励磁调节器的开环放大倍数,观察励磁调节器的各部特性。

c. 进行起励建压、灭磁、手自动切换、双微机切换等试验。在发电机空载状态下,分别检查励磁调节器投入、手动和自动切换、通道切换、带励磁调节器开停机等情况下的稳定性和超调量。

d. 进行空载状态下的阶跃试验。在发电机空载且转速在 95% ~ 100% 额定转速范围内,突然投入励磁系统,使发电机端电压从零上升至额定值,检查电压超调量,不得超过额定值的 10%,振荡次数不超过 2 次,调节时间不超过 5 s。

e. 进行频率变化下机端电压变化率的测定试验(频率特性试验)。在发电机空载状态下,人工加入 10% 阶跃量干扰,检查自动励磁调节器的调节参数,如超调量、超调次数、调节时间。

### 2.2.9 主变压器及高压配电装置短路升流试验

水轮发电机组对主变压器及高压配电装置短路升流试验前应保证 220 kV 线路的有关高压设备均已试验合格,具备投入运行的条件;主变压器经试验验收合格,油位正常,分接开关位置正确;发电机继电保护、水力机械保护装置和主变压器冷却器及其控制信号回路投入。合上 220 kV 主变侧接地刀作为短路点,合线路断路器,切断线路断路器操作电源。

首先检查 220 kV 升流电流回路。由励磁装置手动升流,当 220 kV 侧电流手动升至 60 A 左右时检查主变高压侧、线路侧各电流互感器 1—8 BA 二次电流回路,各电流回路电流应正确,检查正确无开路后,继续升流至 120 A 左右时作主变差动六角图、发变组差动六角图。试验完成后手动减磁、灭磁。

进行主变及高压配电装置单相接地试验。在主变压器高压侧设置单相接地点,将主变中性点直接接地,开机后递升单相接地电流至保护动作,检查保护回路是否正确,校核动作值与整定值是否一致。试验完毕后,拆除单相接地点,投入单相接地保护。试验完毕后,所作的相关措施应进行逐一检查、恢复。

### 2.2.10 主变压器及高压配电装置递升加压试验

由发电机带 1 号主变压器作零起升压,当电压升至 20% 额定电压左右时,检查 13.8 kV 母线电压互感器二次电压及线路电压互感器二次电压。二次电压正确后继续升压至额定电压。检查各部电压相位、相序,相序为正相序,同时检查 1 号机出口断路器同期点相位是否一致(机组出口 PT 和主变低压侧 PT)检查完毕后电压降至零,灭磁。

### 2.2.11 电力系统对主变压器冲击合闸试验

发电机侧的断路器及隔离开关均已断开,投入主变压器的保护装置及冷却系统的控制、保护及信号,投入主变压器中性点接地开关,1号主变压器冲击合闸试验由系统倒送电,合线路断路器来进行,操作冲击合闸期间严密监视主变压器,应无异常声响。对主变压器进行5次冲击合闸试验,第1次冲击停留15 min,以后每次冲击间隔约10 min,检查主变压器有无异状,检查主变压器差动保护及瓦斯保护的动作情况,录制主变励磁涌流曲线。

## 2.3 机组负载试验与试运行

### 2.3.1 机组并列试验

机组空载运行,SF6断路器正常运行。以机组出口断路器为同期点,断开隔离开关,投入自动准同期装置,进行模拟并列试验,断路器自动合闸,录制发电机与系统电压波形图。跳开断路器,根据电压波形图检查、调整合闸导前时间。合上隔离开关,机组以自动准同期方式正式并列。

### 2.3.2 机组带负荷试验

进行励磁系统负载试验,检查励磁负载特性参数,进行过励、欠励试验,过励、欠励限制器的限制特性应符合设计要求。有条件时测量发电机电压调差率,调差特性应线性度良好并符合设计要求。带负荷检查发电机-变压器组保护、线路保护、220kV计量装置等保护计量装置,与线路对侧进行线路保护检查。测量记录机组各部振动、摆度、各部瓦温、油温、油位、冷却水压力、流量、冷却水温度、流量、温度、定子电压电流、转子电压电流、有功功率、无功功率等参数,检查定子、转子气隙与定子局部放电情况。

### 2.3.3 机组甩负荷试验

冶勒水电站的甩负荷试验按照满负荷的25%、50%、75%、100%分4次进行。在试验过程中,测量机组各部振动与摆度。

冶勒水电站冲击式机组的甩负荷试验按照ALSTOM厂家技术要求,采用机组紧急停机方式进行。机组紧急停机流程:首先折向器、喷针动作,跳开机组断路器及励磁系统,关闭球阀,喷针关闭后停止调速器系统,当机组转速低于额定转速的80%后启动高压油顶起装置,待机组转速低于额定转速的70%时电气制动投入。当机组转速低于额定转速的15%时,启动风闸进行机械制动。待机组停机后,高压油顶起装置停止工作,风闸复位,电气制动停止,机组供水系统停止工作。由于冶勒水电站机组转速高、停机时间长,故设计了电气制动以缩短停机时间。现场测得从带满负荷至停机(没有电气制动,仅仅靠高压油顶起装置、风闸启动)的时间大约为35

~40 min,而在电气制动的情况下停机时间只有10多分钟。

对于本电站机组的甩负荷试验,由于试验完成后机组完全处于冷状态,当系统需要重新上网的时候,机组启动的时间影响了系统的需求,最终影响了系统的稳定运行,机组重新启动需要启动球阀和调速器系统,然后开启球阀,启动技术供水系统,最后开启喷针等。冶勒水电站从冷状态至进入满负荷状态至少需要4 min,再加上机组停机至少10 min,从甩负荷开始至下一次带上负荷至少需要25 min。这是因为冶勒水电站进行甩负荷试验时,首先折向器动作,然后喷针开始关闭,折向器通过油压操作开启,弹簧回复关闭。折向器动作时迅速释放折向器油压,折向器要重新打开需要重新启动机组。

冶勒水电站1号机组甩负荷数据见表1,在额定水头下,机组带满负荷120 MW后,进行分阶段甩负荷,折向器动作后机组转速最高为额定转速的108.7%,低于过速试验中的转速(112%的额定转速)。

表1 1号机组甩负荷试验数据

计算工况	喷针关闭时间/s	最大水锤上升率/%	最大水锤值 H/m	折向器关闭时间/s	转速上升率/%
H <sub>水库</sub> = 2650 m H = 612.8 m P = 122.5 MW	40	13.6	700.8	1.5	8.7
H <sub>水库</sub> = 2650 m H = 612.8 m P = 136 MW	40	15	705.7	1.5	8.7

### 2.3.4 机组带负荷72 h试运行

自动开机,机组空载稳定运行,SF6受电运行,各有关设备按照正常设计方式投入运行,机组具备并列条件。以机组出口断路器为同期点,机组以自动准同期方式并列,开始72h连续带负荷试运行。

## 3 结 语

冶勒水电站发电机组全部引进法国ALSTOM厂家设计的产品,尽管在调试过程中出现了一些问题,但通过参建各方的共同努力,机组于2005年11月19日完成机组72h试运行,机组各轴承瓦温、振动、摆度符合厂家标准和国家标准,满足长期稳定运行的要求。

(收稿日期 2006-07-06 编辑 骆超)

