

萨扬水电站 817 事故及对我国水电站机电设备安全运行的警示

王桂平

(中国水利水电科学研究院北京 100038)

摘要: 本文介绍了萨扬-舒申斯克水电站 817 事故情况及原因分析,探讨了对我 国水电站机电设备安全运行的启示,从水电站机电设备的科研、设计、调度、管理等方面提出了安全建议。

关键词: 萨扬-舒申斯克水电站; 817 事故; 机组有功、无功成组调节; 推荐运行区; 不推荐运行区。

0 引言

2009 年 8 月 17 日发生的俄罗斯萨扬·舒申斯克水电站的事故造成 75 人死亡,13 人失踪,2#、7#、9# 机组严重损坏,定子、转子、控制系统、主要开关、辅助设备 etc 全部损坏。其他台机组除正自检修的 6 号机组其控制柜、二次回路和控制线路损坏,损失较轻外,其余机组损失均非常严重,2# 机组、3# 机组和 4# 机组地区厂房的上部结构被完全破坏,安装间、1# 机组和 5# 机组的厂房的上部结构受到严重损害,玻璃窗全部冲毁。据俄罗斯事故原因技术调查委员会估算经济损失约 70 亿卢布。这次事故是由于机电设备的原因引发的,给水电站施工建设期“大水工、小机电”的惯常思维敲响了警钟。图 1 为电站发电厂房事故后的惨景。

本文首先介绍了《俄罗斯水电》开放有限公司分部关于萨扬·舒申斯克水电站事故原因技术报告,探讨我国水电站机电控制设备安全稳定运行应该注意的问题,以便杜绝类似事故的重演。

1 萨扬-舒申斯克水电站概况

萨扬水电站位于俄罗斯西伯利亚叶尼塞河上游,总装机容量 6400 MW,保证出力 2120 MW,平均年发电量 235 亿 kWh,是俄罗斯已建最大水电站。电站挡水建筑物为混凝土重力拱坝,最大坝高 245 m,坝顶长 1066 m。电站发电厂房为坝后式,长 288 m、宽 36 m。电站采用单机单管引水发电,压力钢管为外包混凝土坝后背管,直径 7.5 m。电站进水口宽 7.5m、高 11.5m,设有快速闸门。电站主接线采用扩大单元接线,每 2 台机组与 1 组总容量为 1600MVA 的单相变压器组相连,每台单相变压器的容量为 533MVA,高压侧电压 500kV,位于厂坝间。

萨扬水电站萨扬·舒申斯克水电站于 1963 年开始建设。首台机组 1977 年投入临时运行,1985 年,全部机组投入运行。最先投运的 1 号和 2 号机组用临时转轮发电。1986 年和 1987 年 2 号机组和 1 号机组分别置换了正式工作转轮。厂家设定水轮机运行服役年限为 30 年,而国家标准 (ГОСТ 5616-89) 水轮机运行年限为 40 年。

电站以 500kV 接入俄罗斯西伯利亚电网,发电量占俄罗斯水电公司总发电量的 1/4。据

称，萨扬水电站每年超过一半的电量，约 130 亿 kWh 供应给位于几十公里以外的俄罗斯铝业联合公司（UC RUSAL）所属两座大型炼铝厂以及铝箔厂。

萨扬·舒申斯克水电站水库根据电力系统需求及考虑其他用水用户的需求进行径流日调节、周调节和年调节。

表 1 萨扬水电站机组台数、型式与主要参数

机组型式	混流式	机组台数	10 台
额定容量	640 MW	最大容量	735 MW
额定水头	194 m	最大水头	220 m
额定流量	358 m ³ /s	转轮直径	6.77 m
额定转速	142.8 r/min	飞逸转速	280.0 r/min
水轮机转轮重量	156 t	发电机额定电压	15.75 kV
发电机转子重量	935 t	发电机总重量	1860 t

2 事故简介

2.1 事故回放

据俄罗斯水电公司 8 月 24 日发布的消息，事故发生前，电站 10 台机组中的 9 台正在运行，总出力为 4400 MW。6# 水轮机正在进行定期维护，处于停机状态。

事故发生在 2009 年 8 月 17 日当地时间 8 时 13 分（格林尼治时间 0 时 13 分，莫斯科时间 4 时 13 分）。2# 机组附近发出一声巨响，水柱从水轮机处的空腔喷入主厂房，淹没主厂房发电机层及下面各层。同时，电站中控室发出声光警报，电站出力下降到零，造成局部停电（包括厂用电源）。9 时 20 分水轮机进水口工作门在坝顶被手动关闭，截断了冲入水轮机室的水流。11 时 32 分坝顶门机内移动式应急柴油发电机组启用；11 时 40 分，大坝溢洪道闸门被打开。



图 1 2#机组破坏情况

2.2 事故发生时运行情况

2009年8月16日莫斯科时间0点0分（根据《统一动力网系统调度》开放股份公司的资料）。

——西伯利亚 O₃C 电站工作按计划调度表运行；

——布拉茨克水电站运行，由中央电站自动控制调整频率和出力。

——萨扬·舒申斯克水电站工作按计划调度表运行（为了保证水能枢纽日计划的泄水量，而不受西伯利亚运行调度管理局中央系统的调度）。

2009年8月16日莫斯科时间20时20分，布拉茨克水电站发生火警，与西伯利亚运行调度管理局及伊尔库斯克 P Д V 机构的直通线路也受损。20时31分西伯利亚运行调度管理局给萨扬·舒申斯克水电站值班经理指令，将电站有功和无功功率成组调节转换到西伯利亚运行调度管理局的电网频率和功率过载状态自动调节的中央系统，至2009年8月17日4时12分萨扬·舒申斯克水电站的工作由西伯利亚运行调度管理局中央系统控制。

2009年8月16日23时14分萨扬·舒申斯克水电站2号机组由备用状态投入运行以调节负荷。运行人员根据西伯利亚运行调度管理局下达的任务，将2号机组由有功和无功功率成组调节转为电网频率和功率过载状态自动调节，在超过功率调节范围情况下可优先改变负荷。

2009年8月16日23时31分，萨扬·舒申斯克水电站10号机组由备用状态投运，没有实施有功和无功功率成组调节。

2009年8月17日共有9台水轮机组（1#、2#、3#、4#、5#、7#、8#、9#和10#）工作。6#机组在维修。1#、2#、4#、5#、7#和9#机组由有功和无功功率成组调节转为电网频率和功率过载状态的自动调节。8#和10#机组处于单独调度。

表 2-12#机组功率调节数据表

序号	日期	时间	功率 MW
1	2009.8.16	23:15	50
2	同上	23:17	110
3	同上	23:30	200
4	同上	23:31	165
5	同上	23:44~0:15	600
6	2009.8.17	0:30	135
7	同上	0:30~7:03	从 10 至 255
8	同上	7:03~7:29	600
9	同上	7:30	170
10	同上	7:30~7:45	从 170 至 260
11	同上	7:46	610
12	同上	7:47~8:00	605
13	同上	8:12	575
14	同上	8:13	475
15	同上	8点13分25秒	0

表 2-2 事故发生前(2009年8月17日8时0分)水轮机组设备状态表

水头 H=212.04m; 电流 Ir=26.1 千安; 电站出力 NCT=4390MW; 转速 n=142.8 转/分; 上游水位 BB=537.11m; 下游水位 HB=325.07m; 电压 Ur=15.75 千伏; 频率 f=50 赫

项目	1#机	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
功率 (N, MW)	605	600	570	600	600	维修	120	590	605	100
流量 Q (m ³ /s)	315	312	298	312	312		92	307	315	83
开度 (%)	72	72.5	75	74	73		24	71	74	24
压力: MPa 油泵装置 M H V 25-2/63-3	允许范围内						允许范围内			
水轮机顶盖轴承的振幅 (微米)	200	600	150	110	275		50	175	200	50
尾水管压力 (千克力/cm ²)	0.4	1	0.6	1.1	0.1		1.3	0.5	0.5	1.1
顶盖压力 (千克力/cm ²)	3.2	3.4	3.6	3.3	1.1		2.2	3.5	3.1	2.3

表 2-3 事故发生时(2009年8月17日8时13分)水轮机组设备状态表

上游水位 B =537.11m; 电站出力 NCT=4100MW; 转速 n=142.8 转/分; 下游水位 HB=325.07m; 电压 Ur=15.75 千伏; 频率 f=50 赫; 水头 H=212.04m; 电流 Ir=26.1 千安

项目	1#机	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
----	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

项目	1#机	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
功率 (N, MW)	570	475	570	570	570	维修	85	585	570	100
流量 Q (m ³ /s)	298	256	298	302.5	298		75	305	298	83
开度 (%)	70	69	75	71	69		12	71	71	24
压力: MPa 油泵装置 M H Y 25-2/63-3	允许范围内						允许范围内			
水轮机顶盖轴承的振幅 (微米)	200	840	175	160	160		50	200	170	50
尾水管压力 (千克力/cm ²)	0.5	1.2	0.6	1.2	0.1		1.1	0.5	0.6	1.1
顶盖压力 (千克力/cm ²)	3.2	3.5	3.6	3.3	1.1		2.0	3.5	3.1	2.3

事故发生时, 1#~10#机组的水力状态是在额定范围内的, 轴承轴瓦的温度状态也未超过规定的 80℃。

事故发生时, 水头为 212 米, 在该水头下, 2 号机组容许运行区 I 为 (0-265MW), 推荐运行区为 III (570-640MW), 不推荐运行区 II 为 (265-570MW), 事故发生时, 2 号机组正处于不推荐运行区 II。事故发生时, 2 号机组处于有功和无功功率承租调节控制下, 从 8 月 16 号 23 时 14 分 2 号机从备用转为发电开始, 相机 6 次穿越不推荐运行区 II。制造厂家未规定穿越不推荐运行区的标准和限制, 事实上, 在高于 197 米水头后, 机组的不推荐运行区域很宽而推荐运行区域很窄。

比较表 2-2 和表 2-3 可以发现, 2#水轮机顶盖轴承的振动振幅, 从 8 时 0 分到 8 时 13 分增长了 240 微米, 从 600 微米增加到 840 微米 (最大值应小于 160 微米)。

尾水管压力从 1.0 千克力/cm² 增加到 1.2 千克力/cm², 顶盖压力从 3.4 千克力/cm² 增加到 3.5 千克力/cm²。所有这些导致水轮机出力从基数 600MW 降低到 475MW。

2.3 事故的发生与发展概述

2009 年 8 月 17 日 2#水轮机带负荷运行, 转子在额定频率下运转。从 8 时 12 分起, 2#水轮机组根据电网频率和功率过载状态的自动调节——有功和无功功率成组调节的功率自动调节系统任务运行时, 功率下降, 水轮机组进入不推荐运行区内工作, 发生了水轮机顶盖的螺栓断裂。水轮机组在高压水的作用下, 水力发电机的转子与水轮机的顶盖和上面的十字形机架开始向上运动, 由于密封被撕裂, 高压水开始充满水轮机机坑, 并作用在发电机的构件上涌出。

在工作转轮上冠的出口处 (高程 314.6m), 工作转轮进入抽水状态, 由于发电机转子的储备能量产生了作用在工作转轮叶片前缘上的附加压力, 导致导水装置导叶的破坏, 高压水通过 2#水轮机组空的竖道涌入水电站的厂房。

3 事故发生的原因分析

3.1 技术原因

根据俄罗斯官方的事故原因报告书, 2009年8月16日23时14分电站运行人员根据《统一动力网系统调度》开放股份公司分部——西伯利亚运行调度管理局下达的任务, 将2号机组由备用状态(设备完全处于准备投运状态)投入运行以调节负荷。管理局授权电站人员在超过功率调节情况下可优先改变负荷。

2号机组功率变化的调节是由电站有功和无功功率成组的调节按电网频率和功率过载状态自动调节的指令自动实现的。

萨扬·舒申斯克水电站安装的水力发电机组和水轮机型号为P0-230/833-B-677。制造厂家设定的服役年限为30年。事故发生时水轮机已工作了29年10个月。在水头高出高效率系数区的计算水头时, 该水轮机的调节范围很窄。在超出调节范围时, 水轮机组进入不建议运行区内。在此区工作时会产生流体动力过渡过程, 流道产生脉动压力和水力发电机组的振动加大, 但制造厂家并未规定水轮机在非建议区工作的限制。

在制定有功功率成组调节的技术任务时, 对成组功率调节时, 并未建立水力发电机组工作的优先次序、各个机组的功率和不建议工作区的限制等准则。未设定选择优先机组及保持其优先期限的准则。水力发电机组在功率和频率自动调节过程中的有功和无功功率成组调节作用的计算方法也和水轮机制造厂家不一致。

水力发电机组由于多次穿越不建议运行区, 导致产生交变的附加荷载, 使水力发电机组的固定节点, 连同水轮机项盖发生和发展了疲劳损伤。由动态荷载引发的螺栓破坏导致水轮机项盖和水力发电机组引水通道的密封被撕裂。

3.2 管理原因

在制造厂家和萨扬·舒申斯克水电站运行文件中, 都没有为保证水轮机密封性, 对固定节点的控制状态和服役年限作出的规定。萨扬——舒申斯克水电站在定期检查工作过程中, 都是以目测方法进行控制的, 而未采用水力发电机组设备在安全运行保证期内的无损检测方法。

2009年已安装在2号水力发电机组的不间断振动控制系统并未投入运行, 电站操作人员和领导尚未对该系统的应用作出决定。

从2009年4月21日至2009年8月17日约有4次观测到2号水力发电机组水轮机轴承振动值的升高, 但并未引起足够的重视。

俄罗斯《统一动力网系统调度》开放股份公司——西伯利亚运行调度管理局关于采用“电网频率和功率过载状态自动调节——有功和无功功率成组调节”的功率调节自动管理改变负荷的任务中, 没有考虑所设置的水力发电设备的现技术规格、服役年限和实际状态。

没有关于萨扬·舒申斯克水电站和西伯利亚运行调度管理局之间就设定“电网频率和

功率过载状态自动调节——有功和无功功率成组调节”的出力限制问题交换信息的资料。

3.3 设计原因

萨扬·舒申斯克水电站发生运行人员大量伤亡和技术设施破坏的重大事故，是由于对水电站的设备和人员危险性的综合防护措施设计不完善造成的。例如：

——中央控制台主控盘上缺少驱动压力引水管道的事故——检修闸门投放的备用电源和控制键；

——缺乏在断电时关闭导水装置的调速器柜的水力机械工作的计算方法；

——设备及其电源线路的运用、连接、管理、操控和保护都不能防水、防尘；

——没有为经常和临时工作人员在不会被淹没的高程处设置场所和疏散出口；

——在经常和临时工作人员的场所缺乏必要的个人防护设施。

4 给我们的警示

萨扬-舒申斯克水电站的事故给我们的警示是多方面的，水电站安全运行不仅关系到开发商、运营商的利益，更关系到人身安全以及社会公共环境的安全，因此，认真总结萨扬-舒申斯克水电站的事故原因，从中吸取教训并引以为戒是非常必要的。

萨扬电站事故，首先是由于2号机组在有功、无功成组调节的状态下，多次穿越不推荐运行区，造成了2#水轮机顶盖轴承的振动振幅超过允许值的4倍，（按照运行规范，在此种情况下，应该停机检查），由于水轮机顶盖螺母大部分有程度不同的疲劳性损伤以及部分紧固螺栓没有螺母，因此，发生了水轮机顶盖的螺栓断裂，从而导致了事故的发生。事故发生时，由于通讯中断，中控室没有发出任何命令，后通过电话联系，事故检修闸门由坝顶值班工人手动关闭，闸门关闭的时间不迟于事故当日9时30分。

分析事故原因，应该吸取的教训主要有：

1. 由于机电设备引发的事故与水工不同，新建电站在建设阶段业主往往对机电设备不重视，认为即便设备不好，还可以更换；造成机电设备长期低价无序竞争，长远看，实际损害的是业主自身的利益。从萨扬·舒申斯克817事故中，我们应该认识到机电设备也不能掉以轻心，机电设备问题也能引发灾难性事故。从中我们应引以为戒，摒弃那种“大水工、小机电”的惯常思维。
2. 安全警钟长鸣，时时处处提高安全意识。萨扬·舒申斯克事故撕裂的是小的不能再小的顶盖螺栓、螺母，引发的后果却是机组、厂房被毁及重大人员伤亡，足以说明电力安全无小事。作为机电自动化工程技术人员，应该养成认真、细致的工作作风，不放过工作中的任何一个质量瑕疵，力求精准。
3. 政府应该加强电力生产安全监管，建立和完善机电设备的安全运行标准。市场经济的发展，使许多企业以利润最大化为经营目标，尤其对于一些私营电力企业，设备的更新改造计划很难获批，而机电设备的寿命毕竟是有限的，客观上造成了一些机电设备带病运行，存在安全隐患，因此，建议行业管理部门尽快制定和完善机电设

备安全运行的评估标准和相关细则。

4. 水电站机组在有功及无功成组调节的过程中，穿越振动区几乎是不可避免的，而振动区穿越的次数和条件制造厂家一般也没有提供，建议制造方加强这方面的研究，加强机组稳定性测试。对大中型水电站机组各种运行工况进行稳定性测试，全面掌握机组的稳定特性，并将测试结果作为机组运行控制和自动发电控制 (AGC) 等系统运行参数设定的依据。以便水电站监控系统的研发人员在开发 AGC、AVC 程序时，有据可循，保证水电站的安全稳定运行。
5. 水电站计算机监控系统、调速系统和保护系统的设计应该考虑非常情况下安全可靠地关闭所有设备，中控室应该具备非常情况下关闭事故闸门的手段。在机组的保护和控制回路电压消失时，相关保护和控制系统能够自动动作关闭导水机构。
6. 水电站应该安装水轮机组的在线监测系统，推进机组无损检测技术的发展和运用。加强机组状态监测。大中型水电站应当安装机组在线监测装置。要重视并加强主要机电设备的运行状态监测，尤其要加强机组振动、摆度等运行参数的监测、记录和分析。对于机组振动、摆度突然增大超过标准的异常情况，应当立即停机检查，查明原因和处理合格后，方可按规定程序恢复机组运行。
7. 建议电力调度机构应加强与水电站、水电集控中心的沟通联系，了解和掌握所调度范围水电机组随水头、出力变化的运行特性，优化水电机组的安全调度。在安排和调整水电机组运行方式时，应当考虑其运行限制条件，避免水电机组长时间在振动工况区运行，防止发生设备严重损坏事故。事实上，随着水电装机规模的扩大，要求电网调度部门掌握水电站机组的特性曲线进行优化调度难度较大，应该采用分级调度机制，充分发挥水电流域集控中心对梯级各电站机组优化调度的能力，以保证机组运行的安全性。

5 结束语

总之，水电站机电设备的安全稳定运行是保证水电站安全稳定运行的核心所在。萨扬电站的事故为我们敲响了安全警钟，我们应该引以为戒，在机电设备的设计、科研工作中，建立健全质量安全标准、认真细致地对待每一个细节，保证电力生产的绝对安全。

参考文献:

[1] 2009年8月17日发生在俄罗斯水电集团无限股份责任公司萨扬-舒申斯克水电分公司的事故原因技术调查报告 事故原因调查委员会

作者简介:

王桂平(1965年生)，女，河北省河间人，教授级高工，主要从事水电站计算机监控技术的研发及管理工作。

通信地址：北京市玉渊潭南路3号水科院D座527，邮编：100038，电话：68781775Email：wang_gp@iwhr.com。

