

# 小水电调压井的替代措施

黄宝南 孔繁植 张德虎

李葆武<sup>1</sup> 李福臣

(河海大学农村电气化学院 南京 210098)

(河北省水利厅 石家庄 050011)

TV742 325

**摘要** 本文在广泛调查和搜集资料的基础上,详细介绍了调压井的各种替代措施:导水叶的两段关闭规律;轴流转桨式水轮机采用导叶两段关闭并同时开大桨叶转角;合理选择导叶关闭时间、充分利用引水建筑物和机组的强度;装设调压阀;以安全阀-爆破膜代替调压井;双室式爆破膜;设置水电阻作为机组的替代负荷。这些替代措施在工程实践中都取得了明显的经济效益。据此,作者提出了三个值得进一步探讨的问题。

**关键词** 小型水电站 调压井 调节保证计算 导叶关闭规律 调压阀 安全阀

80年代以前,我国小水电的投资在1000~1500元/kW,但由于价格因素的影响,目前小水电投资已上升到3000~4000元/kW,有的甚至达5000元/kW或以上,使得许多小水电工程不能立项。所以,如何降低小水电造价,是小水电建设中迫切需要解决的问题。作者近期对这一问题作了一次广泛的调查研究,搜集了较为丰富翔实的资料,本文对其中的调压井替代措施作一综述。

在长有压引水系统中,为了改善调节保证计算,减小机组甩负荷后压力管道中过高的水击压力和过高的机组转速,往往在引水系统的适当位置设置调压井。我国《调压井水力计算规范》(草案)中建议以 $\Sigma LV > 15H_0$  ( $L$ 为引水道长度,  $V$ 为引水道中水流速度,  $H_0$ 为最小净水头)作为需要设置调压井的近似判别值。但是,设置调压井的投资大,工期长,而且在某些电站的具体地理地质条件下难以找到适宜设置调压井的位置。然而,在我国小水电建设中,经过多年的探索和实践,对调压井采取了多种替代措施,取得了可观的经济效益。

## 1 导叶两段关闭规律

机组在甩负荷之后的过渡过程中,导叶关闭规律对机组转速升高 $\beta$ 和压力管道压力升高 $\xi$ 以及它们的最大值 $\beta_m$ 和 $\xi_m$ 均有很大影响。经验表明,在间接水击情况下水击波形图下的面积与导叶关闭规律无关,当流量等于零时,只取决于管道参数和甩前流

量。因此,在整个调节时间若能维持水击压力为定值,则最大水击压力升高值 $\xi_m$ 将为最小,这种关闭规律为理想关闭规律。但理想关闭规律在工程实践中不易实现。工程实践中多采用两段或多段关闭规律。最为普遍的是采用两段关闭规律,且多用于低水头水电站(低于70~150m),用以限制 $\xi_m$ ,这是因为低水头电站机组在导叶直线关闭规律下水击压力最大升高值 $\xi_m$ 多发生在末相(而高水头电站多发生在第一相末)。

两段关闭规律在我国中小型水电站中应用较为普遍。图1所示为广西恭城县峻山水电站采用的两段关闭规律。峻山电站(1×1600+2×3200kW)3<sup>#</sup>机的 $\Sigma LV/H=64$ (因资料不全,以甩负荷工况计算),远大于设计规范值,未设调压井,水击压力最大值 $\xi_m$ 发生在第一相末。 $T_{s1}$ 值可由下式求得

$$\frac{\tau_1}{\tau_0} = \frac{T_{sA} - T_s}{T_{sA}}$$

式中  $\tau_0$ 为导叶全开时的开度,即 $\tau_0=1$ ;  $T_{sA}=2.5 \sim 3s$ ;  $T_{s1}$ 由电站调节保证计算确定。

1981年7月19日,峻山电站采用两段关闭规律对3<sup>#</sup>机组进行了甩负荷试验,其主要参数为: $\tau_0=1$ ,  $\tau_1=0.702$ ,发电机甩前出力 $N=1700kW$ ,电站毛水头 $H=22.72m$ 。甩负荷后,测得蜗壳进口压力上升值 $\xi_m=0.876$ ,水压值 $\Delta H=(1+0.876) \times 22.72=45.5mH_2O$ ,小于 $64.5mH_2O$  ( $1mH_2O \approx 9.81kPa$ ),最高速率上升 $\beta_m=0.407 < 0.5$ 。

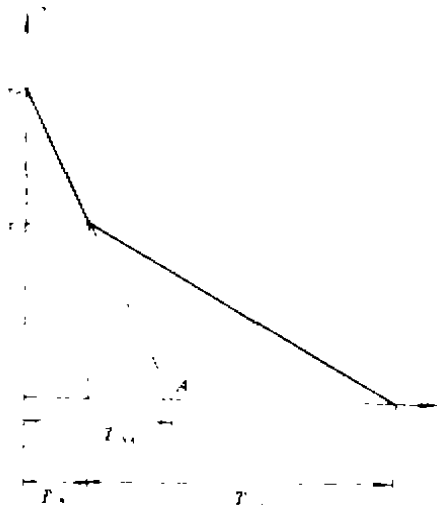


图1 峻山水电站两段关闭规律

## 2 轴流转桨式水轮机采用导叶两段关闭规律并同时开大桨叶转角

轴流转桨式水轮机的飞逸特性,随桨叶转角的变化很大。在机组甩负荷时,开大桨叶转角,可使水轮机的效率迅速降至零,用以限制机组的转速上升;同时,利用开大桨叶转角对水压上升的影响和导水叶的两段关闭规律,可以大幅度地降低水击压力升高值。这一措施最先在河北省岳城水电站得到成功地应用。

岳城水电站装机  $1 \times 17\,000\text{kW}$ , 水轮机型号 ZZ587-LJ-330,  $H_p = 28.5\text{m}$ ,  $H_{\max} = 36\text{m}$ ,  $H_{\min} = 13\text{m}$ ,  $Q_p = 71.1\text{m}^3/\text{s}$ ; 发电机型号为 TS550/80-28,  $n = 214.3\text{ 转}/\text{min}$ ,  $N = 17\,000\text{kW}$ 。压力管道长  $323\text{m}$ ,  $T_w = 2.4\text{s}$ 。当时由于种种原因,未设置调压井。若按直线规律关闭,调保计算值  $\xi_m = 50\%$ ,  $\beta_m = 72\%$ , 成了电站安全运行的一大隐患。

该电站的技术人员为解决这一问题,采用了导叶两段关闭规律(拐点所对应的开度为  $42\%$  左右),同时桨叶以  $2^\circ/\text{s}$  的速度开启。经过几次甩负荷试验,表明二段关闭规律与直线关闭规律比较,水压上升值可相对降低  $30\% \sim 39\%$ , 最高转速上升值可相对下降  $35\% \sim 40\%$ ; 电站在各种水头工况下甩负荷时,均可使  $\beta_m \leq 40\%$ ,  $\xi_m \leq 30\% H_{\max}$ , 从而满足了电站的安全运行要求。

## 3 合理选择导叶关闭时间,充分利用引水建筑物和机组的强度

按照设计规程,调节保证计算的规定值  $\xi_m$  和  $\beta_m$  所对应的应力值,远小于引水建筑物的设计强度值。因此,有一批小型水电站充分利用引水建筑物和机组的强度,使在实际运行中甩负荷时的  $\xi_m$  和  $\beta_m$  值突破了设计规范值。例如,河北省的西大洋、安格庄、洋河水电站,北京市密云县的小岭水电站、福建省的东圳水电站 3<sup>#</sup> 机,广西省的恭城县峻山水电站,江西省的白云山水电站等,在运行中的  $\xi_m$  和  $\beta_m$  值均已突破了有关规范,安全运行至今。现以安格庄和小岭两个水电站为例,详细加以说明。

a. 安格庄水电站。该电站装机  $3 \times 3\,200\text{kW}$ , 水轮机型号为 HL240-LJ-140,  $H_p = 33.98\text{m}$ ,  $H_{\max} = 43.6\text{m}$ ,  $H_{\min} = 22.90\text{m}$ ,  $\Sigma LV/H_0 = 30.45$ , 大于 15 (规范值),  $T_w = \Sigma LV/g = 3.1\text{s}$ , 大于  $1\text{s}$ ; 水轮发电机型号为 TS325/36-20, 机组额定转速为  $300\text{r}/\text{min}$ 。

根据  $\Sigma LV/H_0$  或  $T_w$  值,应设调压井。不设调压井时,若导叶关闭时间为  $3 \sim 4\text{s}$ , 则  $\xi_m$  和  $\beta_m$  值均将超过规范规定值。

制造厂提出的机组加速时间为  $T_a = 5.17\text{s}$ , 大于电站实际的  $T_a = 4.88\text{s}$ ; 厂家规定  $\beta \leq 45\%$ , 但国内有的电站机组已经采用  $\beta = 60\%$ , 而且当机组加速至如此高转速之前过速保护装置(动作整定值一般为额定转速的  $1.15 \sim 1.20$  倍)已经动作,发电机灭磁开关 FMK 也已跑闸,再考虑到发电机转子是按飞逸转速  $670\text{r}/\text{min}$ 、持续 2 分钟设计的,应该说对发电机的安全是没有影响的。

通过合理地选择导叶关闭时间,该电站引水隧洞的钢筋混凝土衬砌的耐压强度满足最大水击压力  $53.8\text{mH}_2\text{O}$  ( $1\text{mH}_2\text{O} \approx 9.81\text{kPa}$ ) 的要求;水轮机的耐压强度为  $65\text{mH}_2\text{O}$  ( $1\text{mH}_2\text{O} \approx 9.81\text{kPa}$ ),也能满足最大水击压力的要求。

采用这一措施后,省去调压井,节省相应投资 30 万元(1974 年价),工期提前一年。从 1978 年 3 月 20 日至 1985 年 5 月,先后经历过 8 次甩负荷(其中 4 台机次为满负荷或接近满负荷),引水建筑物和机组设备未出现任何安全问题,机组带部分负荷时能平稳运行,同期性能也良好。

b. 小岭电站。该电站装机  $2 \times 1\,250\text{kW}$ , 引水系统为压力隧洞,压力管道(从隧洞入口到蜗壳进口)

长 277.0m, 电站水头 17.7~20.5m,  $\Sigma LV=668\sim 750$ 。水轮机型号为 HL260-LJ-120,  $H_p=20.5\text{m}$ ,  $H_{\max}=24\text{m}$ ,  $H_{\min}=12\text{m}$ ,  $Q_T=7.64\sim 8\text{m}^3/\text{s}$ ,  $n=250\text{r}/\text{min}$ ,  $n_p=520\text{r}/\text{min}$ , 机组转动惯量为  $24\text{t}\cdot\text{m}^2$ , 配 DT-1800 调速器。厂家要求  $\xi_m\leq 100\%$ ,  $\beta_m\leq 50\%$ 。水轮机最大承压为  $49\text{mH}_2\text{O}$  ( $1\text{H}_2\text{O}\approx 9.81\text{kPa}$ ), 压力管道的承压为  $50\text{mH}_2\text{O}$  ( $1\text{H}_2\text{O}\approx 9.81\text{kPa}$ )。

$\Sigma LV/H_0=37.74\sim 42.37$ , 大于 15, 按规范应设置调压井, 但受地形地质条件的限制, 不宜设置调压井, 故未设置。

在不设置调压井的情况下, 若采用直线关闭规律, 当关闭时间  $T_c=5\sim 6\text{s}$  时,  $\xi_m=80\%\sim 100\%$ ,  $\beta_m=80\%$ , 若采用两段关闭规律,  $\xi_m$  可降低 30% 左右,  $\beta_m$  可降低 10%。

两台机组同时甩负荷、导叶按两段规律关闭, 实测压力升高为 104%, 未超过水轮机和压力管道的最大承压值; 转速升高为 69%, 超过设计规范和厂家允许值, 小于飞逸转速, 但未出现任何问题。

该电站自 1979 年 12 月 30 日投运, 在 1980 年至 1985 年 9 月期间, 因故累计共甩负荷 75 次 (其中两台机同时甩满负荷计 41 次), 压力管道和机组未出现任何安全方面的问题。

由于取消调压井, 节省投资约 20 万元 (70 年代后期价格), 工期可提前一年。

以上三种替代措施的最大优点是不需增加额外的设备, 简单可行, 经济效益最明显。

## 4 装设调压阀

在  $T_m\leq 12\text{s}$  的中小型水电站中, 可通过装设调

压阀来代替调压井。当机组甩负荷时, 调压阀自动开启, 泄放机组的部分负荷 (一般为  $0.5\sim 0.8Q_T$ ), 随后在一定时间内 ( $20\sim 30\text{s}$ ) 缓慢关闭, 以改善压力管道中的压力升高, 使之限制在容许范围内。蜗壳处的最大压力升高可限制在  $\xi_m=0.15\sim 0.2$ 。据不完全统计, 目前国内和出口机组中“以阀代井”的电站有 24 座之多。

目前调压阀生产厂家可供选择的产品见附表。调压阀的选用范围如图 2 所示。

“以阀代井”的经济效益是很显著的。以河北省青龙县水胡同电站为例, 如建调压井, 当时需投资 65 万元; 而装调压阀仅花 4 万元, 节省投资 93.4%, 安装时间仅一个月, 工期较建调压井提前了一个月, 但与前三种替代措施比较, 增加了调压阀本身的投资, 并相应增加了运行管理工作量。

## 5 以安全阀-爆破膜代替调压井

河北省灵正渠水电站 ( $1\times 800\text{kW}$ ), 水轮机型号为 DJ661-LH-120,  $H_p=14\text{m}$ ,  $H_{\max}=19\text{m}$ ,  $H_{\min}=8\text{m}$ ,  $H_{\frac{1}{2}Q_T}=22\text{m}$ ,  $Q_p=8\text{m}^3/\text{s}$ ,  $n=428.6\text{r}/\text{min}$ ,  $n_p=1050\text{r}/\text{min}$ ; 水轮发电机型号为 TSL215/21-14,  $N=800\text{kW}$ , 配 W-900 调速器,  $T_c=6\text{s}$ 。该电站  $\Sigma LV/H_0=80$ , 电站有孤立运行要求, 因电站属强烈地震地区等原因, 未建调压井, 而以爆破膜-安全阀代替, 以解决调保计算问题, 并征得制造厂的同意, 机组采用允许压力上升  $[\xi]=70\%$  和允许速率上升  $[\beta]=70\%$ 。该措施为电站节省总投资达 10%。

脉冲式安全阀为主保护, 主阀直径为 600mm, 喉径 450mm, 由阀瓣和活塞组成差动活塞, 受副阀控制; 副阀为 D<sub>6</sub>150 弹簧全启式安全阀, 开启压力为

附表 调压阀定型产品

| 项 目                                                    | TFW<br>400/130                     | TFW<br>400/320 | TFW<br>600/130 | TFW<br>600/300 | TFW<br>800/80 | TFW<br>800/60 | TFW<br>1000/100 |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| 直径 $D_r$ (mm)                                          | 100                                | 100            | 600            | 600            | 800           | 800           | 1000            |
| 最大行程 $Y_r$ (mm)                                        | 80                                 | 100            | 150            | 150            | 200           | 200           | 250             |
| 名义水头 $H_p$ (m)                                         | 130                                | 320            | 130            | 300            | 80            | 60            | 100             |
| 最大水头 $H_{\max}=(1+\xi)H_p$ (m)                         | 160                                | 400            | 160            | 360            | 100           | 200           | 120             |
| 最大流量 $Q_r$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) (对应 $H_{\max}$ 时) | 3.15                               | 7.67           | 10.9           | 16.4           | 12.8          | 21.7          | 26.3            |
| 备 注                                                    | 锥形阀室 圆形阀室 圆形阀室 圆形阀室 锥形阀室 圆形阀室 锥形阀室 |                |                |                |               |               |                 |

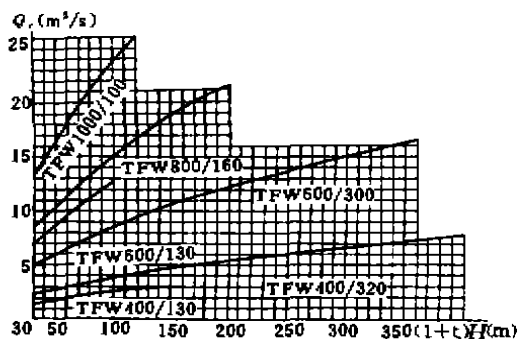


图2 调压阀选用范围图

270kPa;爆破膜作为后备保护,由8片圆形铝质膜片组成。电站自1970年安装爆破膜作为主保护;1978年安装安全阀作主保护,改爆破膜为后备保护,运行至今,安全可靠,动作灵活。其装置结构原理见图3。该措施设备较复杂,设备占用场地较大。

## 6 以双室式爆破膜代替调压井

河北省横山岭水电站(3×500kW)的 $\Sigma LV/H_0 = 40.3$ ,大于15,不建调压井,而采用直径与厚度均不相同的铝膜片主、副爆破膜各一个,形成双室式

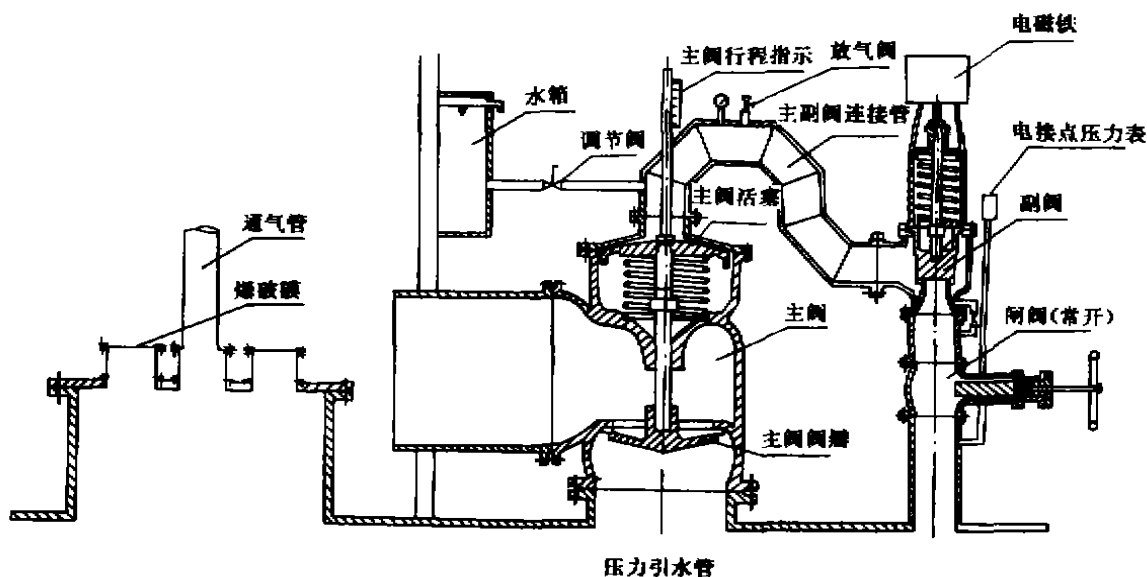


图3 安全阀-爆破膜装置原理示意图

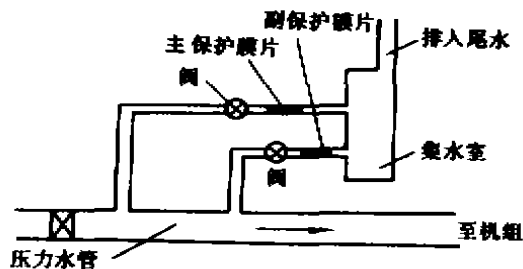


图4 双室式爆破膜装置原理示意图  
爆破膜,用以代替调压井。

机组甩负荷时,当水击压力上升到设计值时,主保护膜片爆破;如果主保护膜片拒爆破,则水击压力

继续上升,当压力升高至后备保护膜片爆破值时,后备保护膜片爆破。在通向主副爆破膜片的管路上分别装有阀门,膜片爆破后只需关闭这两只阀门,不影响机组前的主阀工作。其装置原理示意图如图4所示。显然,这种替代措施简单易行,投资很少,比较适用于流量较小的农村小型水电站;随着机组过流量的增大,双室式爆破膜的面积及片数都会相应增大和增多,泄水管道(渠道)尺寸亦相应增大,设备和占用场地也会相应增大。

## 7 以水电阻作为机组的替代负荷

在我国农村小型水电站中,以水电阻作为机组的替代负荷、用以限制机组在甩负荷后的水击压力升

高值和机组速率上升值,应用比较广泛,尤其在200kW及以下容量的机组中应用尤其普遍。机组甩负荷之后,立即将接于水电阻回路的断路器或接触器合闸,将水电阻作为发电机的替代负荷接入,以限制机组的速率升高,并根据水击压力升高所允许的速度缓慢关闭导水叶,当关至空载开度时切除水电阻。以水电阻作发电机的替代负荷,省去调压井,这种替代措施也十分简单易行,几乎不增加什么投资,也不增加运行维护工作量;但机组容量较大时,设备和场地都存在一定困难。

## 8 结束语

从上面的介绍可知,在我国小水电建设过程中,创造了多种调压井替代措施,产生了明显的经济效益,降低了小水电的建设成本,促进了我国小水电事业的发展。

在这些替代措施中,各个新建电站应根据其具体的工程实践,具体分析,选用适合本工程的调压井替代措施。显然,应优先选用简单而又不需要额外增加投资的替代措施,如导叶两段关闭规律(对转桨式水轮机应同时开大桨叶转角)、引水建筑物和水轮机的承压强度以及机组机械设计强度的充分应用。在此提出下列问题供同行专家们讨论:

a. 在一些中小型水电站的调节保证计算中,以引水建筑物和水轮机的承压强度与机组的机械设计强度(允许持续飞逸2min)作为依据,从理论上讲

是否安全(而这些电站在截止目前为止的运行实践中没有出现安全问题)?在理论上和对以前所制定的有关设计规程还需做些什么深入的探讨?

b. 在调节保证计算中,我国有关规程规定 $\beta_w \leq 50\%$ ,现在有放宽的趋势,但从上面的介绍中,一些电站已以允许飞逸两分钟作为限制条件,这说明 $\beta_w \leq 50\%$ 作为调保计算依据已显得保守,那么,应放宽多大为宜?

c. 在小型水电站中,调压井的替代措施已产生了明显的经济效益,在我国大中型水电站上能否开展调压井替代措施的试验、研究工作?如在这方面取得突破,也必将产生明显的经济效益。

## 参考文献

- 1 辛小岩,辛在森.小型水电站调压室的取代措施.水利水电技术,1985(5):42~49
- 2 任克章,黄虎.轴流转桨式水轮机降低调节保证计算值的新方法.河北水利水电技术,1992(3):43~48
- 3 华东水利学院,武汉水电学院,华北水利水电学院合编.水轮机调节.北京:电力工业出版社,1981
- 4 华东水利学院,华北水利水电学院合编.水电站.北京:水利出版社,1982

(收稿日期:1994-06-21)

▲俄罗斯联邦境内的塔克斯坦共和国电力严重短缺,一是由于车臣战乱使部分输电线路遭到破坏;二是塔克斯坦的电力来源是主要是水电,而冬季山区径流大大减少,因而影响了电力生产;三是塔克斯坦1/3的电是从国外购买的,但由于车臣战事也停止购买了。塔克斯坦现正采取措施使全国电网免遭崩溃。

▲1994年12月,巴西最大的水电联合企业——Xingo水电站投入运行。这座总装机容量为3000MW的水电站经7年施工,耗资32亿美元,(是原预算的两倍)。现第一台机组(500MW)已投入运行,其它5台机组计划于1996年末投入运行。Xingo水电站是巴西北部 and 东部地区供电系统的后盾,该系统供电量每年增加5%。

▲巴西位于亚马逊河上游的Samuel水电站第3台机组(43.3MW)于1994年10月投入运行,这座水电站共有5台机组,总装机容量为210MW。

▲巴西一建筑公司正准备投资4亿美元,拟在智利离圣地亚哥东南部140km处建造两座大坝,计划1995年末拿出初步研究报告。

(熊莉芸 供稿)