

水电站小型机组自动发电经济运行设计

周慧芬, 孙小江

(1. 浙江省温州市水利电力勘测设计院, 浙江 温州 325011; 2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400032)

摘要: 随着水电站项目建设的迅猛发展,越来越多的水电站用户要求微机监控系统具有自动发电控制功能, 该文为此讲述了电厂基于经济运行原则的等微增率法的原理和按给定水头值发电的原理与实现方法,为电厂实现自动发电控制、经济运行提供了依据,具有很强的实际指导意义。

关键词: 自动发电控制; 按给定水头发电; 等微增率法

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)20-0063-04

0 引言

随着近年水电站项目建设的迅猛发展,计算机监控技术的逐渐推广应用,水电站用户越来越多的要求微机监控系统具有自动发电控制功能,实行水电站系统经济运行管理,充分利用有限的水资源,为水电站带来最佳经济效益^[1]。水电站自动发电是根据电力系统的要求、各机组的特性曲线、机组的限制条件、水头、下游水位和流量关系曲线等因素,进行优化计算,以耗水最少、发电效率最高为目标,确定全站总的有功功率给定值,计算当前水位下电站的最佳开机台数,确定应运行的机组号和开停机顺序,自动发出开、停机命令,分配各运行机组的负荷给定值,由各机组现地控制单元(LCU)实现功率闭环调节。

目前,只有个别厂家的软件实现了“无人值班,少人值守”的目标,而很多厂家由于技术及产品原因,并没有真正实现水电站的经济运行,而只是简单的机组顺序控制设计,自动化程度不高,没有真正实现“无人值班,少人值守”的设计要求。现就有关水电站小型机组自动发电控制原理作初步阐述。

1 系统设计基本要求

根据中小型水电站的自动发电控制及经济运行管理要求,一般采用以下三种发电模式:按给定负荷曲线发电(计划发电)、按给定功率值发电和按给定水位值发电(恒水位发电)。

1.1 按负荷曲线发电

按负荷曲线发电是根据电网调度预先下达的给定负荷曲线(一般是日负荷曲线)或电站管理及操

作人员预先给定的负荷曲线来控制水电站机组实际发出的功率,通过机组LCU自动调节控制使机组实际发出的功率与机组给定的负荷曲线相一致,实现计划发电要求。

调度或电站管理及操作人员下达给定负荷曲线时,由主机软件根据等微增率法(见后述)和全厂总负荷曲线计算出各台参与自动发电控制的机组的负荷曲线并下发给各台机组LCU。当AGC控制切换为按给定负荷曲线发电时,各台机组LCU则按各自的负荷曲线实时调节,主机软件实时监控总发有功值是否满足当前负荷曲线。其间,若参与自动发电控制的某机组退出自动发电控制或事故停机,则主机软件及时调整各机组的负荷曲线给定以保证全厂实际出力曲线为给定负荷曲线(在允许误差范围内),若当前运行机组所发有功无法满足全厂总负荷曲线,则还需启动冷备用机组。

1.2 按给定功率值发电

按给定功率值发电是根据电网调度或电站管理值班人员下达的功率给定值来控制水电站机组实际发出的功率,通过自动调节控制使机组实际发出的功率与机组功率给定值相一致,实现按给定功率值发电要求。

调度或电站管理及操作人员下达给定功率值时,由主机软件根据等微增率法(见后述)和给定功率值计算出各台参与自动发电控制的机组的功率值并下发给各台机组LCU。各台机组LCU则按各自的分配功率值实时调节。此种发电方式与按负荷曲线发电相类似,只是操作员或调度给定功率值后只要各机组的工况不发生变化各机组的出力就不会发生变化,直至重新给定功率值。

1.3 按给定水头值发电

按给定水头发电是根据发电机组的出力与水位的关系,通过调节发电机的出力,维持水头为给定值不变,确保机组能处于最佳效能。同时,维持一定的水位既可以维持良好生态、满足航运、水资源灌溉等作用,也利于电站的电力调峰作用,维持电网、负荷的稳定。自动监控水位也能有利于预测水位异常,即时防洪等抵御自然灾害。

2 按给定水头值发电的实现原理

2.1 按给定水头发电的数学模型

按给定水头发电是指通过调节发电机的出力,维持水头为给定值不变。水头是上游水位与下游水位之差,如果水头较高,下游水位变化不大,有时仅仅通过检测上游水位来反映水头的变化。总的规律是水头的变化取决于单位时间内上游进水量 Q_i 和水电站单位时间内出水量 Q_o 之间的差值,当 $Q_i > Q_o$ 时,水头会升高;当 $Q_i < Q_o$ 时,水头会降低;当 $Q_i = Q_o$ 时,水头基本上保持不变。根据水轮发电机组的发电原理关系式: $P = \eta_g H Q_o$, η_g 为水轮机效率,取 $0.85 \sim 0.96$;发电效率 η_g 取 $0.96 \sim 0.98$; $g = 9.81$ 则得公式:

$$P = 9.81 Q H \quad (1)$$

可知,当出水量 Q 和效率 η_g 基本不变时,水头 H 与出力 P 基本上成正比。通过调节水电站的输出功率来调节水流的流出量 Q_o ,保持较高的水头设定值,可以最大限度的利用水能,提高电站的经济效益。

当水头变化不大和上游进水量基本保持不变时,如果电站总出力 P (没有泄洪时基本上与 Q_o 成正比)也保持不变,水头的变化率 dH/dt 为常数。改变 P 的值, dH/dt 将变为另一常数。在上述条件下和一定的范围内, Q_o 的增量 ΔQ_o (或 P 的增量 ΔP) 与水头变化率 dH/dt 的增量之比近似为常数,可以用一条直线来表示 (见图 1)。

设当前水头值为 $H_{(k)}$,保持电站输出功率值为 P 不变,在设定的时间 T_1 到时,测得的水头值为 $H_{(k+1)}$,功率值 P 对应的水头变化率的平均值为

$$H / t = \frac{H_{(k+1)} - H_{(k)}}{T_1}$$

假设在给定功率值 P_1 时,经过设定的时间 T_1 ,测得水头变化率 dH/dt 的平均值为 H_1 / t ,在给定功率值 P_2 时,测得水头变化率的平均值为 H_2 / t

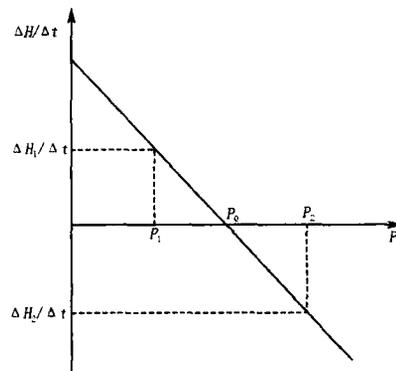


图 1 电站功率 P 与水头变化率 dH/dt 关系图

Fig 1 Station power vs dH/dt

t 可以用式 (2) 计算出图 1 中直线的斜率 K :

$$K = \frac{d(dH/dt)}{dP} = \frac{H_1 / t - H_2 / t}{P_1 - P_2} \quad (2)$$

斜率 K 是实现水头自动控制的重要参数,可以通过实验求得。图 1 中的 P_0 是使水头保持不变的电站输出功率。

设上游进水量为 Q_i ,水电站的出水流量为 Q_o , H 为水电站的水头值, S 为水电站上游库区的水面面积。根据物料平衡原则可得:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{(Q_i - Q_o)}{S} \quad (3)$$

假设在某一时间段内, Q_i 基本上保持不变,而水电站输出功率值 P 与 Q_o 成正比,令 $P = kQ_o$, k 为 P 与 Q_o 的比值,设为一常数。将式 (3) 和 $P = kQ_o$ 代入式 (2) 中:

$$K = \frac{d(dH/dt)}{dP} = \frac{d((Q_i - Q_o)/S)}{dP} = \frac{d((Q_i - P/k)/S)}{dP} = -k/S$$

所以 $K = -k/S$ (4)

如果水头变化不大,水面面积 S 近似不变, K 近似为一常数。

上游进水 Q_i 变为另一常数时,使水头变化率为 0 的出力 P_0 随之变化,由式 (4) 可知, K 值不变,图 3 中曲线的斜率不变,只是左右平移。

由式 (4) 可知,当水头变化较大时, S 值也随之变化,需要修改 K 值,即根据电站情况需动态改变 K 值。

2.2 按给定水头发电的实现

2.2.1 实验准备

将水头调节到电站额定水头 H_0 附近,做实验测

出该水头处的斜率值 K_0 。操作人员应根据经验启动适当台数的机组,首先使得这几台机组以最大功率值运行,此时电站出力值为 P_1 ,此时应使 P_1 大于 P_0 。在实验调节时间 T_2 内保持 P_1 值不变,测量出水头变化率 H_1/T_2 。然后调整其中一台或多台机组的出力,使它们以最小出力值运行,或关闭一台或多台机组,此时全厂机组的出力值为 P_2 ,且应使 P_2 小于 P_0 。在实验调节时间 T_2 内保持 P_2 值不变,测量出水头变化率 H_2/T_2 ,由式(2)计算出 H_0 点处对应的 K_0 值, $k_0 = \frac{(H_1/t - H_2/t)}{P_1 - P_2}$ 。

实验过程中,刚开始时 H 的值应在 H_0 点附近,为了使测得的 K_0 值比较准确,可取较大地调节时间 T_2 。

2.2.2 水头调节算法

A. 计算任意水头 H 值对应的曲线斜率 K 值

水库的面积 S 随上游水位(可近似用 H 表示)的变化而变化,下面用折线来近似 H 与 S 的变化曲线,用分段线性化的方法来求出任意水位时的水库面积 S 。

首先设置上游水位的最大值和最小值和包括最大值、最小值在内的折线分界点总数 N , $H_{(1)} = H_n$, $H_{(N)} = H_m$ 。中间各点可平均分配,例如将 $H_m - H_n$ 平均分为 5 份或 10 份。然后根据上游水位与水库面积的资料,得到每个分界点 $H_{(i)}$ 对应的的水库面积 $S_{(i)}$,顺序保存所有的 $H_{(i)}$ 和 $S_{(i)}$ 。根据图 2,用线性插值法可以得出任意 H 值对应的的面积 S 值的计算公式:

$$S = S_{(i-1)} + \frac{(H - H_{(i-1)}) (S_{(i)} - S_{(i-1)})}{H_{(i)} - H_{(i-1)}} \quad (5)$$

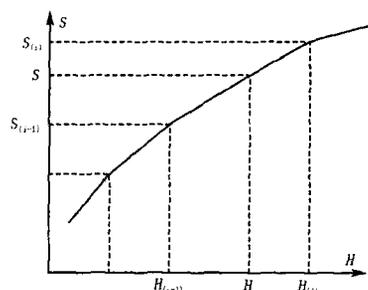


图 2 S 值的折线近似

Fig 2 Broken line approximate of the S

根据当前水头值 H ,判断该水头值在哪个水头区域范围内,求出式(5)中的 i 值,用式(5)计算出对应的水平面积值 S 。

再根据式(4)和对应于设定水头值的水库面积 S_0 和直线斜率 K_0 ,计算出当前水头值 H 对应的直线斜率值 $K = \frac{S_0}{S} \cdot K_0$ 。

B. 水头控制程序设计

定义水头误差

$$H_{er} = H_{set} - H \quad (6)$$

式中: H_{set} 为水头设定值, H 为水头测量值。

将水头误差的绝对值 $|H_{er}|$ 分为 3 段,分别采用不同的控制策略:

1) $|H_{er}| < H_{dead}$ (死区值) 时,全厂功率给定值不变。

2) $|H_{er}| > H_{adj}$ (水头调节分界点) 时,按设定的水头变化率的期望值 H_{spd} ,尽快消除误差。水头比设定值低时, H_{spd} 应为正值,升高水头;水头比设定值高时, H_{spd} 应为负值,降低水头。

本次计算的全厂功率给定值 $P_{(n)}$ 为

$$P_{(n)} = (H_{spd} - \frac{H_{(n)}}{T_{adj}}) / K + P_{(n-1)} \quad (7)$$

式中: $P_{(n-1)}$ 是上次计算的全厂功率给定值, $H_{(n)}$ 是上一计算周期的水头变化量, T_{adj} 是水头控制的计算周期时间。

3) $H_{dead} < |H_{er}| < H_{adj}$ 时,在消除水头误差的同时调节水头的变化率。在这一范围内,令水头的期望变化率与 $|H_{er}|/H_{adj}$ 成正比,即水头误差越小,变化越慢,误差为 0 时,变化率亦为 0,有利于最终进入平衡状态。水头比设定值低时, H_{spd} 应为正值,升高水头;水头比设定值高时, H_{spd} 应为负值,降低水头。全厂功率给定值为

$$P_{(n)} = (H_{spd} \cdot |H_{er}| / H_{adj} - \frac{H_{(n)}}{T_{adj}}) / K + P_{(n-1)} \quad (8)$$

计算出全厂功率给定值 $P_{(n)}$ 之后,先判断 $P_{(n)}$ 是否在全厂所能提供的出力范围 $[P_n, P_m]$ 内,若不在则取极限值。然后调用功率设定值分配子程序,将 $P_{(n)}$ 分配给各台机组,由机组 LCU 实现功率闭环控制,使实发功率趋近于设定值。最后将 $P_{(n)}$ 的值存于 $P_{(n-1)}$,将 $H_{(n)}$ 的值存于 $H_{(n-1)}$,为下一轮的水头调节做准备。

3 负荷分配原理

自动发电控制 AGC 通过综合给定的有功负荷值、动力特性曲线、要求的系统频率范围值、水情等

因素控制机组出力,以实现经济运行。AGC负荷分配原则是按等微增率法则进行分配,使耗水率最小。发电设备在单位时间内输出的功率与消耗的能量的关系称为耗量特性,一般为呈光滑的上凹性曲线,微增率随出力的增加而增大^[2],见图3。

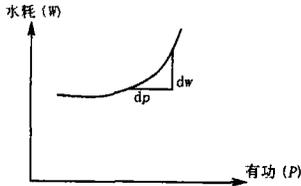


图3 耗量特性曲线

Fig 3 Consumption character curve

对应于曲线上某一输出功率的微增率就是该点的曲线斜率:

$$b = dw / dp$$

式中: dw 为输入耗量微增量; dp 为输出功率微增量。

全厂总的耗水量的目标函数可写成

$$W_{\Sigma} = W_1(P_1) + W_2(P_2) + \dots + W_n(P_n) = \text{最小值}$$

其所要满足的约束条件为有功功率保持平衡^[3],即

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = P$$

式中: P_i 为第 i 台机所发有功, P 为全厂所带有功。

根据拉格朗日乘数法可解得:

$$dW_1/dP_1 = dW_2/dP_2 = \dots = dW_n/dP_n = b$$

这表明:当全厂有功功率一定时,为使总耗水量最小,各机组间应按相等的耗量微增率来分配负荷。

4 结论

本文介绍了水电站机组自动发电控制及经济运行的算法和实现原理,具有很强的实际指导作用。目前,此设计方式已经经过现场实际调试和运行,效果比较好。但在不同类型机组的小型水电站应用时,会有所不同,要根据每个站的具体情况以及机组等情况进行相应条件判断和相应处理。

参考文献:

- [1] 华中工学院. 水电站经济运行 [M]. 北京:水利电力出版社, 1980.
Huazhong Institute of Technology. Hydropower Station Economical Operation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1980.
- [2] 张勇传. 水电站经济运行 [M]. 北京:水利电力出版社, 1997. 1-40.
ZHANG Yong-chuan. Hydropower Station Economical Operation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1997. 1-40.
- [3] EL - Hawary M E, Chistensen G S. Optimal Economic of Electric Power System [M]. New York: Academic Press, 1979. 33-35.

收稿日期: 2006-04-17; 修回日期: 2006-07-03

作者简介:

周慧芬 (1972 -), 女, 工程师, 主要从事电力系统水电站机电自动化设计及研究; E-mail: summn@vip.sina.com

孙小江 (1971 -), 男, 硕士, 主要从事电力系统微机继电保护与控制自动化研究。

Automatic generating economical operation design of small sized hydropower station

ZHOU Hui-fen, SUN Xiao-jiang

(1. Zhejiang Wenzhou Water Conservancy & Electric Exploration and Designing Institute, Wenzhou 325011, China;

2. Chongqing New Century Electrical Co., Ltd, Chongqing 400032, China)

Abstract: With great development of hydropower project, more and more hydropower stations require micro-computer monitoring system owns automatic generating control function. This paper introduces power station principles on equal incremental equations and generating principle and implement method on set water head to provide reference to power station automation generating control and economical operation. It is a reference for relevant designs of hydropower stations.

Key words: automatic generating control; generate on set water head; equal incremental equations