

龙头水库梯级电站群的经济运行*

徐光先

(郑州工学院)

摘 要: 针对农村中龙头水库梯级电站群的特点,建立了这类梯级电站群长期经济运行、短期经济运行的动态规划数学模型,提出了模型求解、补偿调节和时滞计算的方法。

关键词: 梯级电站, 经济运行、补偿调节

中图分类号: F407.9

龙头水库梯级电站群是指由一个具有一定调节能力(如年调节)的龙头水库电站串联下游若干个径流式电站的水电系统。在该系统中,龙头水库承担着调节径流丰枯和系统负荷峰谷的作用,以及对下游各梯级电站出力和发电量的补偿作用。这类水电系统的经济运行问题较为复杂。本文结合农村水电系统的特点,提出了实现长期经济运行和短期经济运行的一种简单实用的优化方法。

1 龙头水库梯级电站群长期经济运行

设龙头水库梯级电站群中有 m 个串联的梯级电站和具有所调节能力的上游龙头水库,如图1所示。图中 Q_r 为某时段龙头水库入库水量, V 是龙头水库相应时段蓄水量, $Q^1, Q^2 \cdots Q^j (j=1,2,\cdots,m)$ 为第 j 个电站发电用水量, Q'_j 为第 j 个电站上游区间来水量。假定 Q_r 和 Q'_j 已知,且认为 Q'_j 为第 j 个电站可以引用发电的水量。本系统与大电网有电气联结,存在电力电量相互调济关系。计算时期由 n 个时段(月)组成,在采用计算期内系统总发电量最大为最优化准则时,可建立如下数学模型

$$\text{目标函数} \quad \max E = \sum_{t=1}^n N_t \quad (1)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_{t=1}^n Q_t = \omega \quad (2)$$

式中 N_t 和 Q_t 为 t 时段站群的发电量和发电引用水量。其中

$$Q_t = Q_t^1 + Q_t^2 + \cdots + Q_t^j + \cdots + Q_t^m$$

* 收稿日期: 1993-11-08

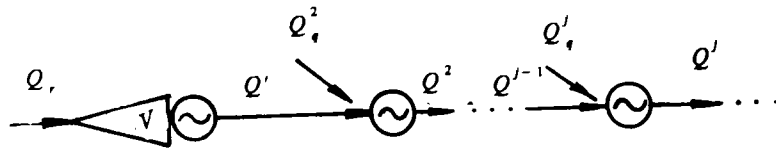


图 1 龙头水库梯级电站群示意图

由图(1)并考虑到第 $j(j=2,3,\cdots m)$ 个电站最大发电流量 Q''_j 的限制,有

$$Q'_t=\begin{cases} Q'_t+\sum_{j=2}^jQ''_{qt}& \text{当 } Q'_t+\sum_{j=2}^jQ''_{qt}\leq Q''_j \\ Q'_j & \text{当 } Q'_t+\sum_{j=2}^jQ''_{qt}> Q''_j \end{cases} \tag{3}$$

$$j=2,3,\cdots m$$

相应的 t 时段站群发电量 N_t

$$N_t=9.81\{\eta'Q'_tH'_t+\sum_{j=2}^m\eta'Q''_jH'_j\} \tag{4}$$

采用动态规划法按逆序递推计算时,递推方程为

$$E_{t,n}(V_t)=\max_{Q'_t\in\Omega}\{N_t(V_t,Q'_t)+E_{t+1,n}(V_{t+1})\} \tag{5}$$

式中 $E_{t,n}(V_t)$ —— t 时段初龙头水库蓄水量为 V_t 时,从时段 t 到最末时段 n 的水电站群的最优发电量;

$E_{t+1,n}(V_{t+1})$ —— $t+1$ 时段初龙头水库蓄水量为 V_{t+1} 时,从时段 $t+1$ 到最末时段 n 的水电站群的最优发电量;

$N_t(V_t,Q'_t)$ —— t 时段初龙头水库蓄水量为 V_t 和发电流量为 Q'_t 时, t 时段内水电站群的发电量,见式(4);

Ω ——为龙头电站发电流量 Q'_t 的可行域,即约束条件的范围和集合。

状态转移方程为

$$V_{t+1}=V_t+Q_{rt}-Q'_t-e(V_t,Q'_t) \tag{6}$$

且应满足:非汛期时

$$V_s\leq V_t+Q_{rt}-Q'_t-e(V_t,Q'_t)\leq V_{zh} \tag{7}$$

汛期时

$$V_{zh}\leq V_t+Q_{rt}-Q'_t-e(V_t,Q'_t)\leq V_{fx} \tag{8}$$

式中 $e(V_t,Q'_t)$ ——龙头水库 t 时段水面蒸发损失;

V_s,V_{zh},V_{fx} ——分别为龙头水库相应于死水位、正常蓄水位和防洪限制水位的蓄水量。

当递推计算至第 1 时段时,即可求得实现龙头水库梯级电站群经济运行下龙头水库

最优放水发电流量 Q'_{it}^* ($i = 1, 2, \dots, n$)。此时下游各梯级电站发电流量为:

$$Q'_{it}^* = \begin{cases} Q'_{it}^* + \sum_{i=2}^j Q_{qt}^i & \text{当 } Q'_{it}^* + \sum_{i=2}^j Q_{qt}^i \leq Q''_j \\ Q''_j & \text{当 } Q'_{it}^* + \sum_{i=2}^j Q_{qt}^i > Q''_j \end{cases} \quad (9)$$

$j = 2, 3, \dots, m$

龙头水库对下游梯级电站的补偿调节发电量为 E_h^*

$$E_h^* = 9.81 \sum_{j=2}^m \eta^j (Q'_{it}^* - \sum_{i=2}^j Q_{qt}^i) H_t^j \quad (10)$$

2 龙头水库梯级电站群短期经济运行

在农村水电网中, 龙头水库梯级电站群, 不但是电源的主力, 还是调峰任务的主要承担者。因此, 在短期(日)运行时, 龙头水库的日补偿调节作用要保证站群的日出力过程与其日负荷曲线最佳配合, 在任一时刻保证站群总出力不小于负荷的要求。因而, 龙头水库梯级电站群短期经济运行问题可以描述为: 在保证满足日负荷曲线要求的条件下, 充分利用下游无调节能力的各梯级电站的区间径流, 使龙头水库发电放水量最小, 即是一个负荷在站群中各电站间最优分配问题。

与长期经济运行不同, 站群在短期运行时, 负荷变化频繁, 要求发电流量即时进行调节, 由此而来, 产生了龙头水库梯级电站群短期经济运行的特殊问题。其一是上一级电站放流达下一级电站需要经过一段时间, 称为水流时滞, 使得在取用下游各梯级电站发电流量时, 必须考虑水流时滞的影响。其二是即使下游各梯级电站没有日调节池, 其前池及上游渠道的槽蓄调节作用, 也会使上一级电站放流过程的形态发生变化, 即流经下一级电站时流量过程线发生“坦化”(类似于河道洪水演进)。

因此, 龙头梯级电站群的短期经济运行可分解为两个问题进行求解: 首先确定时段 t 的负荷 N_t 在各电站间的最优分配, 随之也就确定了运行电站的最优组合; 然后计入水流时滞和槽蓄作用的影响, 确定龙头水库提前放水的时间, 我们称为超前调度时间。

进行负荷在电站间的分配时, 如前所述, 应首先充分利用区间径流的水能资源。 t 时段第 j ($j = 2, 3, \dots, m$) 个电站在区间流量为 Q_{qt}^j 时的出力为:

$$N_{qt}^j = 9.81 \eta^j Q_{qt}^j H_t^j \quad (11)$$

从第 $2(j = 2)$ 至第 m 个电站在利用区间径流进行发电条件下总出力为:

$$N_{qt} = N_{qt}^2 + N_{qt}^3 + \dots + N_{qt}^m = 9.81 \sum_{j=2}^m \eta^j Q_{qt}^j H_t^j \quad (12)$$

当 t 时段站群负荷 $N_t \leq 9.81 \sum_{j=2}^m \eta^j Q_{qt}^j H_t^j$ 时, 龙头水库电站不需要投入运行和对下游各电站进行补偿调节, 负荷仅在 $j = 2, 3, \dots, m$ 个电站间进行分配。此时, 可在满足负荷

要求的前提下, 按照优先选择机组性能好, 距离负荷中心近的电站等原则, 确定投入运行的电站组合。在我国当前电力较为紧张的情况下, 这种情况一般不会出现于峰荷时期。

在峰荷时期, 常有 $N_t > N_{qt}$, 而 $N_t - N_{qt}$ 即为需要龙头水库电站承担的负荷 N'_{kt} 与对下游各级电站补偿出力 N_{ht} 之和 N_{kt} , 即

$$N_{kt} = N_t - N_{qt} \quad (13)$$

$$\text{及} \quad N_{kt} = N'_{kt} + N_{ht} \quad (13)$$

$$\text{而} \quad N'_{kt} = 9.81\eta' Q'_{kt} H'_{kt} = N'_{kt} (Q'_{kt})$$

$$\text{或者} \quad Q'_{kt} = Q'_{kt}(N'_{kt}) = N'_{kt} / (9.81\eta' H'_{kt}) \quad (15)$$

Q'_{kt} 既是龙头电站的发电流量, 又是对下游各级电站补偿调节发电流量。若第 j ($j=2, 3, \dots, m$) 个电站的最大出力为 N''_j 和最大发电流量为 Q''_j 时, 则可对该电站补偿的最大出力为 $N''_j - 9.81 Q''_j \eta^j H^j_{kt}$, 相应的补偿调节发电流量为 $(N''_j - 9.81 Q''_j \eta^j H^j_{kt}) / (9.81 \eta^j H^j_{kt})$ 令 $j=2, 3, \dots, m$ 各电站中 $(N''_j - 9.81 \eta^j Q''_j H^j_{kt}) / (9.81 \eta^j H^j_{kt})$ 值最大者了最小者分别为 Q''_{ht} 和 Q'_{ht} , 即

$$Q''_{ht} = \max_{j=2,3,\dots,m} \{(N''_j - 9.81 \eta^j Q''_j H^j_{kt}) / (9.81 \eta^j H^j_{kt})\} \quad (16)$$

$$\text{和} \quad Q'_{ht} = \min_{j=2,3,\dots,m} \{(N''_j - 9.81 \eta^j Q''_j H^j_{kt}) / (9.81 \eta^j H^j_{kt})\} \quad (17)$$

则根据 Q'_{kt} 和 Q''_{ht} , Q'_{ht} 的关系, 可以确定龙头水库对 $j=2, 3, \dots, m$ 各电站的补偿情况:

$$\text{各电站获得完全补偿时, 当 } Q'_{kt} \geq Q''_{ht} \quad (18)$$

$$\text{部分电站获得完全补偿, 部分电站获得不完全补偿, 当 } Q'_{ht} \leq Q'_{kt} \leq Q''_{ht} \quad (19)$$

$$\text{各电站均获得不完全补偿; 当 } Q'_{kt} < Q'_{ht} \quad (20)$$

若第 j 个电站实际补偿调节流量为 Q^j_{ht} , 取 $j=2, 3, \dots, m$ 各电站的 Q^j_{ht} 与它们中间最大者 (令其为 Q_{ht}) 的比值分别为 $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_m$, $0 \leq Q_{ht} \leq Q''_{ht}$, 则这些电站的总的补偿出力为 N_{ht} 为

$$N_{ht} = 9.81 Q_{ht} \sum_{j=2}^m \eta^j \lambda_j H^j_{kt} \quad (21)$$

$$\text{由此} \quad Q_{ht} = N_{ht} / 9.81 \sum_{j=2}^m \eta^j \lambda_j H^j_{kt} \quad (22)$$

利用式 (15)、(22)、(14) 可作出图 2 所示 $Q'_{kt} = Q'_{kt}(N'_{kt})$ 、 $Q_{ht} = Q_{ht}(N_{ht})$ 和 $Q(N'_{kt} + N_{ht})$ 曲线。利用这些曲线即可确定 N'_{kt} , N_{ht} 和相应的龙头水库放水流量 Q'_{kt} , 即根据 $N_{kt} = N_t - N_{qt}$, 在横坐标轴上取点 a 坐标为 N_{kt} , 自 a 点向上引垂直线与 $Q = Q(N'_{kt} + N_{ht})$ 曲线相交于 b 点, 过 b 点作水平线, 分别与 $Q'_{kt} = Q'_{kt}(N'_{kt})$, Q_{ht}

$= Q_{ht}(N_{ht})$ 和纵轴相交于 d 、 c 和 e 点, e 点的坐标即为 Q'_t , 然后分别自 c 、 d 点向下作垂线与横轴交点即为 N'_t 和 N_{ht} , 有了 Q'_t 和 Q_{qt}^j 、 Q''_j , 就不难计算各电站的补偿调节流量 Q_{ht}^j 、补偿出力 N_{ht}^j , 承担的负荷 N'_j 以及确定其补偿程度。

根据日负荷曲线, 将全日分为谷荷期, 腰荷期和峰荷期等几个时段, 分时段按上述方法进行计算, 计算时 N'_t 采用相应时段的最大负荷, Q_{qt}^j 采用日平均流量。

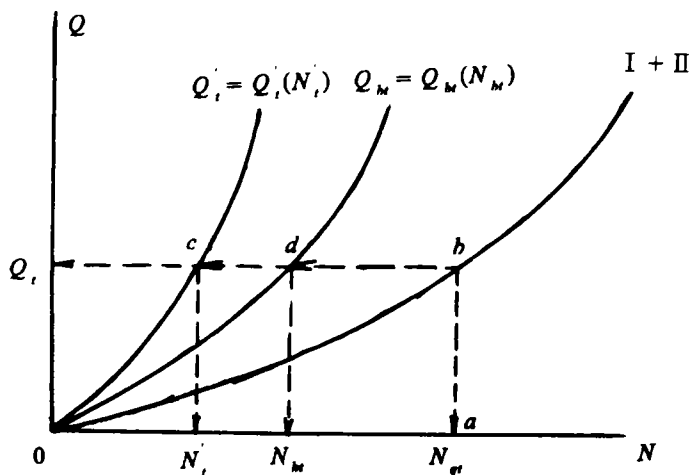


图2 流量曲线

在上述计算中求得的 Q'_t 为龙头水库放水在同一时刻 t 流经各水电站的流量, 考虑水流时滞和槽蓄延时的影响, 为满足对 Q'_t 这一要求, 需要龙头水库提前放水。为简化计算, 超前调度时间可以这样确定: 设 Q'_t 从第 1 个电站流达第 m 个电站的时间为

$\tau = \sum_{i=1}^{m-1} \tau_{ij} (i=1, 2, \dots, m-1; j=i+1)$, 各电站槽蓄总延时为 $\Delta t = \sum_{j=2}^m \Delta t_j$, 时段内负荷增加时间 (即从需要补偿出力开始至时段最大负荷的时间) 为 ΔT , 则超前调度时间 $t_{1,m}$ 为

$$t_{1,m} = \begin{cases} \Delta T, & \text{当 } \Delta T \geq \tau + \Delta t \\ \tau + \Delta t, & \text{当 } \Delta T < \tau + \Delta t \end{cases} \quad (23)$$

其中梯级之间的水流传播时间 τ_{ij} 为

$$\tau_{ij} = l_{ij} / 1.5V_{ij} \quad (24)$$

第 j 个电站的槽蓄延时 Δt_j 为

$$\Delta t_j = \Delta V_j / Q'_t \quad (25)$$

式中

$$\Delta V_j = \Delta h_j (F_j + \frac{2}{3} \Delta h_j / \Delta H_j \cdot \Delta t_j b_j) \quad (26)$$

式中 l_{ij} ——两梯级之间的水路距离;

V_{ij} ——两梯级之间的水流平均流速;

F_j ——前池水面面积;
 Δh_j ——前池水位允许变幅;
 ΔH_j ——渠道总高差, $\Delta H_j = \Delta l_j \cdot i_0$;
 Δl_j ——引水渠长;
 i_0 ——渠道比降;
 b_j ——渠道设计水位时的水面宽度。

若时段最大负荷历时为 T_F , 则龙头水库放水 Q' 的历时为 T , $T = T_F + t_{1,m}$ (27)

3 结 语

本文提出的梯级电站长期与短期经济运行的方法, 原理简明, 方法易于操作和便于编程计算, 为这类水电系统的经济运行提供较为实用的方法。如前文所述, 这类水电系统具有特定的前提条件, 使该方法具有一定的局限性。

参 考 文 献

1 水利部农村水电司, 农村电气化研究所. 水小电优化运行——理论与方法. 浙江大学出版社, 1990 年.
2 华中工学院主编, 水电站经济运行, 电力工业出版社, 1981 年
3 鄢建华等编, 中小水电站的优化运行和管理, 水利电力出版社, 1985 年

Economic Operation of the Cascade Hydropower
Stations Group with Stopcock—reservoir

Xu Guangxian

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In accordance with the operational characters of the cascade hydropower stations group with Stopcock—reservoir in rural areas, dynamic mathematical models are established for Long-term economic operation and short-term econmic operation of the cascade hydropower stations group, the methods for soling these models and for computing compensating regulation and time—dalay are suggested.
Keywords: cascad hydropower stations, economic operation, compensating regulation