

水电站群装机容量的优化选择*

尹明万 鄢建华

(成都科技大学水利系)

要 提

本文探讨了以水、火电系统计算期的累积净效益最大为目标的水电站群装机容量的优化选择。模型反映的因素众多,需参加优化的变量很少,在四川电力系统的应用表明,较能适应大电力系统水电站群装机容量的优化。

近几十年来,系统工程理论和电子计算机技术在水电规划中得到了广泛应用和迅速发展^[1,2,3]。虽然,目前国内外对水电站群装机容量的优化选择作了大量的研究,但均未能同时考虑水电站修建时序、水电季节性、动态电力电量平衡等重要因素。即使如此,该问题所要求的计算机内存和时间往往也难以满足^[4,5]。本文针对此课题的这些难点进行探讨。

一、总体数学模型

(一) 优化的目标

设系统共有 $M_2 + M_3$ 座水电站; X 是规划水电站群的装机容量,为 M 维列向量;计算期 TN 年,其中规划期 TP 年、寿命期 $TN - TP$ 年。系统的各种投资、费用以及收益都折现到计算初始年 ($t=0$)。除特别说明外,各量单位见表1。枯、中水年各指

表1 单 位 表

名称	装机容量、出力、负荷	电量	资金	水头、水位	流量	库 容	
单位	万千瓦	万度	万元	米	米 ³ /秒	(输入资料)亿米 ³	(计算过程中) (米 ³ /秒)月

水电站群的设计枯、中水年。水电站群的电库容调节、枯水年枯水期的优化补偿调节(简称优化补偿调节)、电力平衡均用枯水年来水资料,电量平衡用中水年来水资料。

累积净效益 从系统发电总收益 PB 中,扣除水电站群建设投资(包括固定资产投资 PH_1 、可变投资 $p_4(X)$)和运行费 $p_5(X)$ 、火电站群建设投资 $p_1(X)$ 、扣除煤费的火电运行费 $p_6(X)$ 、火电煤费 $p_2(X)$ 以及应分摊的煤矿等设施的建设投资 $p_3(X)$ 。

优化目标 系统计算期的累积净效益最大。

(二) 主要约束条件

1. 各时段电力平衡;
2. 各时段各月电量平衡;

* 本文系硕士论文摘要,导师鄢建华。

3. 水电站群建设各时段以及整个规划期的投资上限;
4. 各规划水电站装机容量最大值、最小值约束;
5. 各水电站的相互关系: (1) 修建时序、工期及投产情况; (2) 地理和水文关系、水位库容特性、调节能力、下游水位流量特性。

(三) 总体数学模型

$$\text{目标} \quad \max \{ PB - PH_t - \bar{p}(X) \} \quad (1-1)$$

$$\text{约束} \quad N_{\text{水}t}(X) + N_{\text{火}t}(X) \geq N_{\max}(t) \quad (1-2)$$

$$E_{\text{水}t,j}(X) + E_{\text{火}t,j}(X) = E_{t,j} \quad (1-3)$$

$$K_{\text{水}i_1}(X) \leq C_{\text{投}i_1} \quad (1-4)$$

$$0 \leq X \leq X_{\max} \quad (1-5)$$

式中 $\bar{p}(X)$ ——满足约束条件的系统内各种与 X 有关的投资、费用之和;

t ——年份, 在 (1-2)、(1-3) 式中, t 分别为电力、电量平衡年份;

i_1 —— $i_1 = 1, \dots, M_1$ 水电站群投资平衡时段, $i_1 = M_1$ 表整个 TP 期;

j —— $j = 1, \dots, 12$ 月份;

$N_{\text{水}t}(X)$ 、 $N_{\text{火}t}(X)$ ——分别为 X 对应的年份 t 在枯水年来水情况下电力平衡期水、火电站群所能发出的有效最大出力 (即在第 t 年中保留适当的备用容量, 并扣除水、火电站的厂用电和输电损失);

$N_{\max}(t)$ ——年份 t 系统的最大负荷;

$E_{\text{水}t,j}(X)$ 、 $E_{\text{火}t,j}(X)$ ——各为 X 对应的年份 t 、月 j 的水、火电有效电量;

$E_{t,j}$ ——年份 t 、月 j 系统负荷要求的电量;

$K_{\text{水}i_1}(X)$ ——水电站群装机容量 X 方案下, 在时段 i_1 的总投资, 对多用途工程只计发电分摊的投资;

$C_{\text{投}i_1}$ ——时段 i_1 允许的水电站群总投资上限, $C_{\text{投}}$ 记 $C_{\text{投}i_1}$ 构成的 M_1 维列向量;

$X_{\max}$ ——规划水电站群最大装机容量, M 维列向量。

水电站修建时序及投产过程、投资平衡及价格调整时段, 如图 1 所示。

(四) 数学模型的分析及变形

1. (1-1) 式等价于

$$\min \bar{p}(X). \quad (1-6)$$

2. 我国各流域的枯水期一般都是在年际交替期间, 而年末系统的最大负荷往往是或接近年最大负荷。因此, 以这段时期的电力平衡作为全年的控制条件, 由 (1-2) 式计算 $p_1(X)$ 。

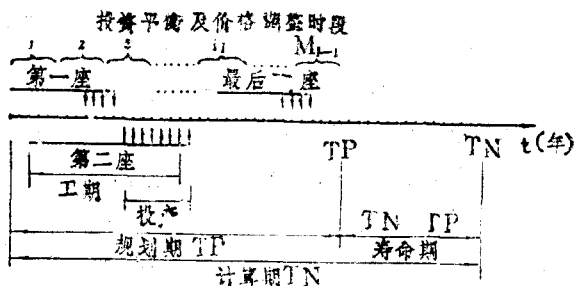


图 1

在上述前提下, 系统对火电装机容量及火电煤耗量的要求是可行的, 则 (1-3) 式可代入函数 $\bar{p}(X)$ 的计算中去。将 $\bar{p}(X)$ 改记为 $p(X)$ 。

$$p(X) = \sum_{i_0=1}^6 p_{i_0}(X) \quad (1-7)$$

3. 将各水电站的与其装机容量有关的投资和无关的投资分开, (1-4) 式可转化为

$$A \cdot X \leq U \quad (1-8)$$

式中 A ——各水电站各时段可变投资计算系数矩阵, $M_1 \times M$ 维。 A_{i1} 、 A_{i2} , i 各表 A 的行向量和元素 ($i_1=1, \dots, M_1; i_2=1, \dots, M$)。

U ——水电站群可变投资约束列向量、 M_1 维, 各分量 U_{i1} 为 $C_{投i1}$ 扣除对应时段水电站群的固定投资。

4. 变形后的数学模型

$$\begin{aligned} &\text{目标} \quad \min p(X) \\ &\text{约束} \quad \begin{cases} A \cdot X \leq U \\ 0 \leq X \leq X_{max} \end{cases} \end{aligned} \quad (1-9)$$

转化为无约束极小化问题:

$$\min L_p(X) = \min \left\{ p(X) + \gamma_k \sum_{s=1}^{M_1+2M} (h_s(X))^2 \right\} \quad (1-10)$$

$$\text{式中} \quad h_s(X) = \begin{cases} \bar{h}_s & \bar{h}_s < 0 \\ 0 & \bar{h}_s \geq 0 \end{cases}$$

对 $s=1, \dots, M_1$, $\bar{h}_s = U_s - A_s X$; 对 $s=M_1+1, \dots, M_1+M$, $\bar{h}_s = X_s - M_1$; 对 $s=M_1+M+1, \dots, M_1+2M$, $\bar{h}_s = X_{\max s-(M_1+M)} - X_{s-(M_1+M)}$ 。 γ_k 为罚因子, 随迭代次数 k 增大而增大, 直到解满足精度要求为止。

5. 求解方法。 $p_1(X)$ 、 $p_2(X)$ 、 $p_3(X)$ 、 $p_5(X)$ 为非线性函数, 且难以用连续函数表示, 因此本文建立一个相应于枯水年枯水期水电站群优化补偿调节子模型。从初始年起每 TD 年运用一次该子模型, 求出历年水电站群保证出力最大的水库调节方案 (取 TD 年内其他年的最优调节方案与计算年的相同)。对任一 X , 再以各电力平衡年 t 按该年水库群最优调节方案调节发出的保证出力参加系统电力平衡, 求 $p_1(X)$ 、 $p_5(X)$ 。采用一个历年相应于中水年水电站群等流量调节子模型来模拟系统复杂的运行情况, 由电量平衡求得 $p_2(X)$ 、 $p_3(X)$ 。 $p_4(X)$ 、 $p_5(X)$ 直接由 X 求出。用非线性单纯形法来实现本文的各种优化。

二、综合计算

(一) 负荷计算

根据初始年系统各季典型最大日负荷 $N_{日, j_1, j_2}$ ($j_1=1, \dots, 4$ 表季, $j_2=1, \dots, 24$ 表日内小时); 规划期负荷年增长率 R_3 (%), 负荷月不均匀系数 R_2 , 可得出任意年 t 的各典型

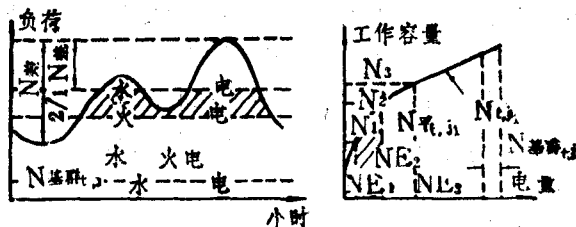


图2

型的日负荷曲线及其分析曲线, 如图2所示。 (b) 中 $N_{平, j_1}$ (以日平均出力计) 为

(a) 中阴影部分的面积。

(二) 发电总收益

设初始年每度电煤费、电价各为 C_2 、 B (万元/万度)，年利率、物价上涨率各为 R (%)、 R_1 (%)。电价、煤价每 TG 年调整一次，在 TG 年内稳定，它们的平均年上涨率为 R_0 (%)、 R_{10} (%)， T 变为第 i_1 次煤价、电价稳定或投资平衡时段年份的集合。寿命期各年的负荷及需电量的增长，计入下一规划期内。寿命期水电站的出力与发电量与规划期最后一年的相等。 T 变中平均电价：

$$B_t = B \cdot RE(t) \quad t=0, 1, \dots, TN \quad (2-1)$$

$$PB = B \cdot E_0 \cdot \left[\sum_{t=0}^{TP} R_{\text{负}}(t) \cdot RE(t) \cdot (1+R)^{-t} + R_{\text{负}}(TP) \sum_{t=TP+1}^{TN} RE(t) \cdot (1+R)^{-t} \right] \quad (2-2)$$

式中 $RE(t) = \frac{1}{TG} \sum_{t \in T \text{ 变}} (1+R_0)^t$ ——电价系数。

$$E_0 = 91.2 R_2 \sum_{j_1=1}^4 \sum_{j_2=1}^{24} N_{H_{j_1, j_2}}$$

同理，第 t 年的煤价系数 (已折现) 为

$$RP(t) = \frac{1}{TG} \sum_{t \in T \text{ 变}} (1+R_{10})^t \cdot (1+R)^{-t} \quad t=0, \dots, TN \quad (2-3)$$

(三) 简化电站群

对任一年 t 将系统已有的水电站视为一座，需要新增加的视为一座。水电站分为蓄水式和径流式。将上游始终无蓄水式电站的原有径流式水电站合并为一座，它们枯水年和中水年的各月出力过程分别合并为一个行力过程 N_{0, i_0} ($S_0=1, 2$ 分别表枯、中水年)。设被合并的水电站 M_0 座，记为 $i_3=1, \dots, M_3$ ；未合并水电站 M_2 座，分别位于 L 条河流上，先将 L 条河流记为 $l=1, \dots, L$ ，再按 l 由小到大，每条河流由上到下 (不计已合并的水电站) 对 M_2 座统一编号，记为 $i_2=1, \dots, M_2$ ，以 IL_1 记河流 l 上最后一级的 i_2 。

(四) 水电站群投资计算

1. 投资计算 规划水电站按其统一编号 i_2 由小到大编号，记为 $i=1, \dots, M$ ，令 $IX_i=i_2$ 。以 T_{0i} 、 T_{5i} 、 T_{6i} 、 T_{4i} 分别表示规划水电站 i 的可变投资的开始投资年份、从开始投资到开始发电的年数、投资年数、年投资比例换线年数*；以 TF_{0i} 、 TF_{5i} 、 TF_{4i} 分别表示电站 i 的固定投资的开始投资年份、投资年数、投资比例换线年数；以 $C_{\text{固}i}$ 、 $C_{\text{单}i}$ 分别表示固定投资和补充千瓦投资。以 IX 、 T_0 、 TF_0 、 T_4 、 TF_4 、 T_5 、 T_6 、 TF_6 、 $C_{\text{固}}$ 、 $C_{\text{单}}$ 记上述各量构成的 M 维列向量。分别以 M 维列向量 T_1 、 T_2 、 TF_2 、 T_3 记各新建水电站开始投入运行年份、可变投资和固定投资的投资结束年份及完全投入运行年份。

* 反映各工程在工期中总投资不同年份分配比例关系的两条直线转换处的年数。

$$T_1 = T_0 + T_5 \quad (2-4)$$

$$T_2 = T_0 + T_6 \quad (2-5)$$

$$TF_2 = TF_0 + TF_6 \quad (2-6)$$

$$T_3 = T_2 + I \quad (2-7)$$

式中 I ——分量为 1 的 M 维列向量。

对任一 t, i 可导出

$$t_{\text{施}k,i} = \begin{cases} t - TF_{0i} & k=1, 2 \\ t - T_{0i} & k=3, 4 \end{cases} \quad (2-8)$$

$$K_{\text{分}k,i,t} = \begin{cases} AK_{k,i} + BK_{k,i} \cdot t_{\text{施}k,i} & \text{当 } k=1, 2 \text{ 时, } 0 \leq t_{\text{施}k,i} \leq TF_{6i} \text{ 或} \\ & \text{当 } k=3, 4 \text{ 时, } 0 \leq t_{\text{施}k,i} \leq T_{6i} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2-9)$$

式中 $k=1, 2$ 时, $K_{\text{分}k,i,t}$ 为 $C_{\text{固}i}$ 的分配系数, 当 $0 \leq t_{\text{施}k,i} \leq TF_{4i}$ 时, $k=1$, 否则 $k=2$; $k=3, 4$ 时, $K_{\text{分}k,i,t}$ 为 $C_{\text{单}i}$ 的分配系数, 当 $0 \leq t_{\text{施}k,i} \leq T_{4i}$ 时, $k=3$, 否则 $k=4$; $AK_{k,i}, BK_{k,i}$ 由电站 i 的固定投资过程和可变投资过程的特性确定。

$$A_{i1,i} = C_{\text{单}i} \sum_{t \in T_{\text{变}}} K_{\text{分}k,i,t} \cdot RC(t) \quad k=3, 4 \quad (2-10)^*$$

$$A_{M1,i} = \sum_{i1=1}^{M1-1} A_{i1,i} \quad (2-11)$$

$$K_{\text{固现群}i1} = \sum_{i=1}^M \sum_{t \in T_{\text{变}}} C_{\text{固}i} \cdot K_{\text{分}k,i,t} \cdot RC(t) \quad k=1, 2 \quad (2-12)$$

$$K_{\text{固现群}M1} = PH_t = \sum_{i1=1}^{M1-1} K_{\text{固现群}i1} \quad (2-13)$$

$$U = C_{\text{投}} - K_{\text{固现群}} \quad (2-14)$$

式中 $i_1=1, \dots, M_1-1$; $RC(t) = \left(\frac{1+R_1}{1+R} \right)^t$; $K_{\text{固现群}}$ 为 $K_{\text{固现群}i1}$ 构成的 M_1 维列向量。

2. 水电站及煤矿投资系数 设煤矿及水电站的工期各为 $t_{\text{矿}}$ 、 $t_{\text{火}}$ 年, 初始年增加单位火电量分摊的煤矿等设施的总投资为 C_3 (万元/万度), 单位火电容量的投资为 C_1 (万元/万千瓦)。当第 t 年系统增加 $\Delta E_{t,t}$ 万度火电量时, 在 $t_{\text{矿}}$ 年中各年增加 $\frac{\Delta E_{t,t}}{t_{\text{矿}}}$ 相应的投资, 折现到第 t 年为

$$S_{\text{矿}} = C_3 \cdot R_7 \cdot \Delta E_{t,t} \cdot (1+R_1)^t \quad (2-15)$$

式中 $R_7 = \frac{1}{T_{\text{矿}}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1+R}{1+R_1} \right)^{t_{\text{矿}}}}{1 - \frac{1+R}{1+R_1}}$ ——煤矿等设施的投资换算系数。

同样可导出火电装机容量的投资换算系数

* $A_{i1,i}$ 为公式(1-8)矩阵 A 的元素。

$$R_s = \frac{1}{T_{\text{火}}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1+R}{1+R_1} \right)^{t_{\text{火}}}}{1 - \frac{1+R}{1+R_1}} \quad (2-16)$$

(五) 水电站群电库容调节

设系统共有(原有的和规划的) M_4 座蓄水式电站, 按其统一编号 i_2 由小到大记为 $i_2 (i_2=1, \dots, M_4)$, 令 $IS_{i_2}=i_2$ 。蓄水式电站 i_2 的有效库容、相应的正常高水位、死水位各为 V_{i_2} 、 ZN_{i_2} 、 ZL_{i_2} , 水位库容关系为 $ZV_{i_2} \sim VZ_{i_2}$, 库容 VZ_{i_2} 指 ZN_{i_2} 与水位 ZV_{i_2} 的总库容之差; 未合并水电站 i_2 的出力系数、平均水头、平均上游水位、各月区间流量为 AN_{i_2} 、 H_{i_2} 、 $Z_{\text{平上 } i_2}$ 、 QI_{i_2, i, s_0} 。下游水位 $Z_{\text{下 } i_2}$ 与流量 $Q_{\text{下 } i_2}$ 的关系为

$$Z_{\text{下 } i_2} = QZ_{i_2} + ZQ_{i_2} \cdot Q_{\text{下 } i_2} \quad (2-17)$$

式中 系数 QZ_{i_2} 、 ZQ_{i_2} 由电站 i_2 流量经常出现的那段水位流量关系曲线确定。

取 $S_0=1$, 对任一年 t , 令新建水电站中第 t 年还没有完全投入运行的电站统一编号的集合

$$ID_t = \{IX_i | t < T_{3i}, i=1, \dots, M\} \quad (2-18)$$

则可依次求得每一电站 i_2 的各月天然出力 $N_{i_2, j}$ 和水电站群天然出力过程

$$N_{\text{水 } j} = \sum_{i_2=1}^{M_2} N_{i_2, j} + N_{0, j, s_0} \quad (2-19)^*$$

将各库容的单位换算为 $(\text{米}^3/\text{秒}) \cdot \text{月}$, 以 EE_{i_2} 表蓄水式电站 i_2 的电库容, 令 $i_2 = IS_{i_2}$, 则

$$EE_{i_2} = \begin{cases} V_{i_2} \sum_{i_2=i_2}^{IL1} E_{i_2} & i_2 \in ID_t \\ 0 & i_2 \in ID_t \end{cases} \quad (2-20)$$

$$\text{式中 } E_{i_2} = \begin{cases} AN_{i_2} \cdot H_{i_2} & i_2 \in ID_t \\ 0 & i_2 \in ID_t \end{cases} \quad (2-21)$$

水电站群的总电库容

$$EV = \frac{1}{10000} \sum_{i_2=1}^{M_4} EE_{i_2} \quad (2-22)$$

设 $J_{\text{蓄}}$ 、 $J_{\text{供}}$ 、 $T_{\text{蓄}}$ 、 $T_{\text{供}}$ 、 $N_{\text{蓄}}$ 、 $N_{\text{供}}$ 各为水电站群计算年的蓄、供水期月份集合、月数及平均出力。

$$N_{\text{蓄}} = \frac{1}{T_{\text{蓄}}} \left(\sum_{j \in J_{\text{蓄}}} N_{\text{水 } j} - EV \right) \quad (2-23)$$

$$N_{\text{蓄}} \leq N_{\text{水 } j} \quad j \in J_{\text{蓄}} \quad (2-24)$$

$$N_{\text{蓄}} > N_{\text{水 } j} \quad j \in J_{\text{蓄}} \quad (2-25)$$

* 公式(2-19)中 N_{0, j, s_0} 为合并水电站的同年同月份的总出力。

$$N_{\text{供}} = \frac{1}{T_{\text{供}}} \left(\sum_{j \in J_{\text{供}}} N_{\text{水}j} + EV \right) \quad (2-26)$$

$$N_{\text{供}} < N_{\text{水}j} \quad j \in J_{\text{供}} \quad (2-27)$$

$$N_{\text{供}} \geq N_{\text{水}j} \quad j \in J_{\text{供}} \quad (2-28)$$

联解得蓄、供水期的起止月份 J_k , 令 $JT_{t,k} = J_k$, $k=1, \dots, 4$, $JT_{t,5} = T_{\text{蓄}}$, $JT_{t,6} = T_{\text{供}}$. 取 $JT_{t',k} = JT_{t,k}$ ($t < t' < t + TD$, t' 为未进行电库容调节计算的年份; $k=1, \dots, 6$). 以 JT 记 $JT_{t,k}$ ($t=0, \dots, TP$; $k=1, \dots, 6$) 构成的矩阵。

(六) 库水位约束

在优化补偿调节中, 将供水期分为前、后半供水期。由 JT 和 T_3 得任意年 t 的完全投入运行的水电站组合以及前、后半供水期的月份集合 $J_{\text{前}}$ 、 $J_{\text{后}}$ 。对未合并水电站 i_2 若 $i_2 \neq IS_{i_4}$ ($i_4=1, \dots, M_4$), 则考查下一水电站; 否则得 i_4 , 然后计算

$$W_{\text{前}} = \sum_j Q_j \quad (j \in J_{\text{前}}, \text{且 } Q_j < Q_{\min i_4}) \quad (2-29)$$

$$W_{\text{后}} = \sum_j Q_j \quad (j \in J_{\text{后}}, \text{且 } Q_j < Q_{\min i_4}) \quad (2-30)$$

$$V_{\max} = V_{i_4} + W_{\text{后}} - Q_{\min i_4} \cdot J_7 \quad (2-31)$$

$$V_{\min} = Q_{\min i_4} \cdot J_6 - W_{\text{前}} \quad (2-32)$$

式中 $Q_j, Q_{\min i_4}$ ——分别为蓄水式电站 i_4 的 j 月来水流量和下游要求的最小流量;

J_6, J_7 ——各为 $J_{\text{前}}$ 、 $J_{\text{后}}$ 中 $Q_j < Q_{\min i_4}$ 的月数。

由 $V_{\max}, V_{\min}$ 及 $ZV_{i_4} \sim VZ_{i_4}$ 得前半供水期末该库的最低、最高水位。这样, 从初始年起每 TD 年算一次, 最后取各次最低水位的最高值为下限 $Z_{\min i_4}$, 取最高水位的最低值为上限 $Z_{\max i_4}$ 。各径流式电站下游最小流量由其区间来水和上游蓄水式电站放水来保证。

(七) 水电站群的基荷出力

根据各水电站的最小恒定流量 (下称基荷流量) QB_{i_3} 和 QB_{i_2} , 各月基荷系数 $IB_{i_3,i}$ 和 $IB_{i_2,i}$ (为 0—1 变量, 由各水电站的调节性质和电力系统的特点确定。电站必须担任基荷时取 1, 否则取 0), 以及初始年实际装机容量 NC_{i_3}, NC_2 , 得枯水年来水情况下, 各年供水期水电站群的最大基荷出力 NB_i 和中水年来水情况下, 合并水电站群初始年各月的基荷出力 $N_{\text{基}i}$ 。

三、优化补偿调节子模型

(一) 保证出力 $f_{\text{保}i}(Z)$ 的优化子模型

$$\text{目标 } \max f_{\text{保}i}(Z) \quad (3-1)$$

$$\text{约束 } Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \quad (3-2)$$

式中 $Z, Z_{\min}, Z_{\max}$ ——分别为年 t 蓄水式电站前半供水期末的库水位、前文求出的库水位下限值和上限值, 均为 M_4 维列向量。

$f_{\text{保}t}(Z)$ ——年 t 的水电站群保证出力。

转化为无约束极小化问题

$$\min L_{\text{保}t}(Z) = \min \left\{ -f_{\text{保}t}(Z) + \gamma_k' \sum_{S=1}^{2M_4} [g_s(Z)]^2 \right\} \quad (3-3)$$

$$\text{式中 } g_s(Z) = \begin{cases} \bar{g}_s, & \bar{g}_s < 0 \\ 0, & \bar{g}_s \geq 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

对 $S=1, \dots, M_4$, $\bar{g}_s = Z_s - Z_{\min s}$; 对 $S=M_4+1, \dots, 2M_4$, $\bar{g}_s = Z_{\max s - M_4} - Z_{S-M_4}$ 。 γ_k' 为罚因子。记其最优解为 Z_t 。

(二) $f_{\text{保}t}(Z)$ 的计算

分别以 $T_{\text{前}}$ 、 $T_{\text{后}}$ 表前、后半供水期的月数。对任一 Z , 河流 l 上水电站 i_2 月 j ($j \in J_{\text{供}}$) 的计算如下 ($S_0=1$):

1. 若 $l=1$, 且 $i_2=1$, 或 $l>1$ 且 $i_2=IL_{l-1}+1$, 则 $Q_{\text{上}i_2}=0$ 。

$$Q_{\text{来}i_2, i} = Q_{\text{上}i} + QI_{i_2, i, S_0} \quad (3-5)$$

若 $i_2 \in ID_t$, 则令 $Q_i = Q_{\text{来}i_2, i}$, $N_{i_2, i} = 0$, 转 (5), 否则

2. 若 $i_2 \neq IS_{i_4}$ ($i_4=1, \dots, M_4$), 则令 $Q_i = Q_{\text{来}i_2, i}$, $Z_{\text{上}i_2} = Z_{\text{平}i_2}$, 转 (4), 否则得 i_4 。

3. 由 Z_{i_4} 及 $ZV_{i_4} \sim VZ_{i_4}$ 关系得前、后半供水期的供水量 $V_{\text{前}}$ 、 $V_{\text{后}}$ 。

$$Q_i = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{前}}} \left(\sum_{j \in J_{\text{前}}} Q_{\text{来}i_2, i} + V_{\text{前}} \right) & j \in J_{\text{前}} \\ \frac{1}{T_{\text{后}}} \left(\sum_{j \in J_{\text{后}}} Q_{\text{来}i_2, i} + V_{\text{后}} \right) & j \in J_{\text{后}} \end{cases} \quad (3-6)$$

$$Z_{\text{上}i_2} = \begin{cases} 0.5 (ZN_{i_4} + Z_{i_4}) & j \in J_{\text{前}} \\ 0.5 (Z_{i_4} + ZL_{i_4}) & j \in J_{\text{后}} \end{cases} \quad (3-7)$$

4. 由 Q_i 及 (2-17) 式得 $Z_{\text{下}i_2}$,

$$N_{i_2, i} = \frac{1}{10000} AN_{i_2} \cdot Q_i \cdot (Z_{\text{上}i_2} - Z_{\text{下}i_2}) \quad (3-8)$$

5. 令 $Q_{\text{上}i} = Q_i$

水电站群的保证出力

$$f_{\text{保}t}(Z) = \min_{j \in J_{\text{供}}} \left\{ N_{0j, 1} + \sum_{i_2=1}^{M_2} N_{i_2, i} \right\} \quad (3-9)$$

四、电力电量平衡子模型及各项投资和费用计算

(一) 水电站群的装机容量

在规划阶段, 各规划水电站的总装机容量及其投入运行的过程都不能完全确定。根据近来一些已成水电站的装机过程的经验分析, 可近似认为: 各规划水电站 i 在 T_{i1} 到

T_{3i} 年间投入容量均匀增加。历年 t ($t=1, \dots, TP$) 各未合并水电站 i_2 的装机容量 NHH_{i_2} 和水电站群实际总容量 $N_{水装t}$ 为:

$$N_{水装t=0} = \sum_{i_3=1}^{M_3} NC_{i_3} + \sum_{i_2=1}^{M_2} NC_{i_2} \quad (4-1)$$

令集合 $IDX_t = \{i \mid T_{1i} \leq t \leq T_{3i}, i=1, \dots, M\}$

$$N_{水装t} = N_{水装t-1} + \sum_{i \in IDX_t} \frac{X_i}{T_{3i} - T_{1i} + 1} \quad t=1, \dots, TP \quad (4-2)$$

若 $i_2 \neq IX_i$ ($i=1, \dots, M$), 则 $NHH_{i_2} = NC_{i_2}$; 否则得 i

$$NHH_i = \begin{cases} 0 & t < T_{1i} \\ \frac{t - T_{1i} + 1}{T_{3i} - T_{1i} + 1} \cdot X_i & T_{1i} \leq t \leq T_{3i} \\ X_i & t > T_{3i} \end{cases} \quad (4-3)$$

(二) 电力平衡

从初始年起, 在 TP 期中每 TD 年计算一次在最优补偿调节方案 Z_t 下水电站群的保证出力 $N_{水保t}$ 。其求法与 $f_{保t}(Z)$ 的求法不同之处只是要考虑年 t 各水电站的实际装机容量约束。以 NB_t 担任系统基荷, 其余水电出力优先担任峰荷, 并根据水、火电出力或电量有效系数 R_4 、 R_5 和备用容量系数 RH 、 RF 及火电可调峰系数 R_6 , 在系统供水期典型日负荷分析曲线上进行电力平衡, 求得需增加的火电容量 $\Delta N_{火装t}$ 及火电容量 $N_{火装t}$ 。并令 $N_{火装t'} = N_{火装t}$, $\Delta N_{火装t'} = 0$ ($t < t' < t + TD$)。

(三) 电量平衡

1. 出力计算

(1) 取 $S_0=2$ 。对任一年 t ($t=0, 1, \dots, TP$), 若 $t=0$, 则转(2); 否则若 $N_{水装t} = N_{水装t-1}$, 各月水电出力与 $t-1$ 年相同, 继续算 $t+1$ 年; 反之做(2)。

(2) 对河流 l 上未合并水电站 i_2 , 由(3-5)式得 $Q_{来i_2, i}$ 。

(3) 若 $i_2 \neq IX_i$ ($i=1, \dots, M$), 则转(6); 否则得 i 。

(4) 若 $NHH_{i_2}=0$, 则转(10); 否则

(5) 若 $T_{3i} > t$, 则转(8), 否则

(6) 若 $IS_{i_4} \neq i_2$ ($i_4=1, \dots, M_4$), 则转(8); 否则得 i_4 。

(7) 对蓄水式电站 i_4 进行等流量调节得调节流量 Q_i 和库水位 $Z_{上i_2}$, 转(9)。

(8) $Z_{上i_2} = Z_{平上i_2}$ (4-4)

$Q_i = Q_{来i_2, i}$ (4-5)

(9) 由 Q_i 和(2-17)、(3-8)式得 $Z_{下i_2}$ 、 $N_{i_2, i}$ 。

$$N_{i_2, i} = \begin{cases} N_{i_2, i} & N_{i_2, i} \leq NHH_{i_2} \\ NHH_{i_2} & \text{其他} \end{cases} \quad (4-6)$$

$$Q_{基i} = \begin{cases} Q_i \cdot IB_{i_2, i} & Q_i \cdot IB_{i_2, i} \geq QB_{i_2} \\ QB_{i_2} & \text{其他} \end{cases} \quad (4-7)$$

$$\bar{N}_{基i2,j} = \frac{1}{10000} A N_{i2} \cdot Q_{基j} \cdot (Z_{上i2} - Z_{下i2}) \quad (4-8)$$

若 $\bar{N}_{基i2,j} \geq NHH_{i2}$, 则取 NHH_{i2} 。 $\bar{N}_{基i2,j}$ 为中水年水电站 i_2 月 j 的基荷出力。
转 (11)。

(10) 令 $Q_j = Q_{来i2,j}$, $N_{i2,j} = 0$, $\bar{N}_{基i2,j} = 0$

(11) 令 $Q_{上j} = Q_j$

水电站群总出力及基荷出力过程分别为

$$N_{水j} = N_{oj,so} + \sum_{i2=1}^{M_2} N_{i2,j} \quad (j=1, \dots, 12) \quad (4-9)$$

$$\bar{N}_{基群t,j} = \bar{N}_{基合j} + \sum_{i2=1}^{M_2} \bar{N}_{基i2,j} \quad (j=1, \dots, 12) \quad (4-10)$$

2. 电量平衡 初估月 j 需火电出力

$$N_{火j} = \frac{1}{R_5} (N_{日平t,i1} - N_{水j} \cdot R_4) \quad (4-11)$$

式中

$$N_{日平t,i1} = \frac{R_2}{24} \cdot \sum_{i2=1}^{24} N_{日t,i1,i2}$$

水电可担任峰荷的平均出力 $N_{水峰j}$

$$N_{水峰j} = N_{水j} - \bar{N}_{基群t,j} \quad (4-12)$$

火电可调峰的出力 $N_{火峰j}$

$$N_{火峰j} = R_5 \cdot R_6 \cdot N_{火j} \quad (4-13)$$

拟定 $N_{火峰j}$ 的工作位置是从最大负荷扣除 $1/2$ 峰谷负荷差 $N_{差}$ 后, 对应位置向下担任, 见图 2。

$$\text{令} \begin{cases} N_1 = \frac{1}{2} N_{差} \\ N_2 = N_1 + N_{火峰j} \\ N_3 = R_4 \left(\frac{1}{RH} N_{水装t} - \bar{N}_{基群t,j} \right) + N_{火峰j} \end{cases} \quad (4-14)$$

从日负荷分析曲线上得 NE_1 、 NE_2 、 NE_3 , 水电可调峰容量所能发出的有效最大日平均出力为

$$N_5 = NE_1 + NE_3 - NE_2 \quad (4-15)$$

若 $N_{水峰j} \cdot R_4 \geq N_5$, 则有弃水, 取 $N_{水j} = \frac{1}{R_4} N_5 + \bar{N}_{基群t,j}$, 再由 (4-11) 式得 $N_{火j}$; 否则无弃水。

3. 年需火电量 $E_{f,t}$ 及 $p_2(X)$ 、 $p_3(X)$ 的计算

$$E_{f,t} = 729.6 \sum_{j=1}^{12} N_{火j} \quad (4-16)$$

$$\Delta E_{f,t} = \begin{cases} 0 & t=0 \\ E_{f,t} - E & t>0 \end{cases} \quad (4-17)$$

若 $\Delta E_{t,t} < 0$, 则取 $\Delta E_{t,t} = 0$; 若 $t=0$ 则取 $E = E_{t,t}$; 若 $E \leq E_{t,t}$, 则取 $\bar{E} = E_{t,t}$.

$$p_2(X) = C_2 \cdot \left[\sum_{t=0}^{TP} E_{t,t} \cdot RP(t) \cdot E_{t,TP} \cdot \sum_{t=TP+1}^{TN} RP(t) \right] \quad (4-18)$$

$$p_3(X) = C_3 \cdot R_7 \cdot \sum_{t=0}^{TP} (\Delta E_{t,t} \cdot RC(t)) \quad (4-19)$$

(四) 水、火电站建设投资及运行费

$$p_4(X) = A_{M1} \cdot X \quad (4-20)$$

$$p_5(X) = C_5 \cdot \left[\sum_{t=0}^{TN} N_{\text{水装}t} \cdot RC(t) + N_{\text{水装}t=TP} \left(\frac{1+R_1}{1+R} \right)^{TP+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1+R_1}{1+R} \right)^{TP-TP}}{1 - \frac{1+R_1}{1+R}} \right] \quad (4-21)$$

$$p_1(X) = R_8 \cdot C_1 \cdot \sum_{t=0}^{TP} \Delta N_{\text{火装}t} \cdot RC(t) \quad (4-22)$$

$$p_6(X) = C_6 \cdot \left[\sum_{t=0}^{TP} N_{\text{火装}t} \cdot RC(t) + N_{\text{火装}t=TP} \cdot \left(\frac{1+R_1}{1+R} \right)^{TP+1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1+R_1}{1+R} \right)^{TN-TP}}{1 - \frac{1+R_1}{1+R}} \right] \quad (4-23)$$

五、数值分析及结论

(一) 数学模型在四川电力系统中的应用

四川电力系统近期规划的水电站 5 座。本文对规划水电站拟定的三个修建时序方案分别求出了水电站群装机容量的优化成果。以时序 1 为例, 规划水电站群的最优装机容量比常规方法得到的多 97 万千瓦, 寿命期内每年多发水电 28.6 亿度, $p(X)$ 减少 1.6%, 即增加净效益约 3.3 亿元。本文还以时序 1 作为基本顺序方案, 对利率进行了参数分析 (见图 3), 还对 C_5 、 C_6 、 $C_{\text{固}}$ 、 $C_{\text{单}}$ 、 C_2 、 R_1 、 R_9 和 R_{10} 等参数进行了灵敏度分析, 揭示了它们对优化成果的影响程度。

在 MV/6000 计算机上, 优化补偿调节每年约需 CUP 时间 1 分钟。整个模型 (包括优化补偿调

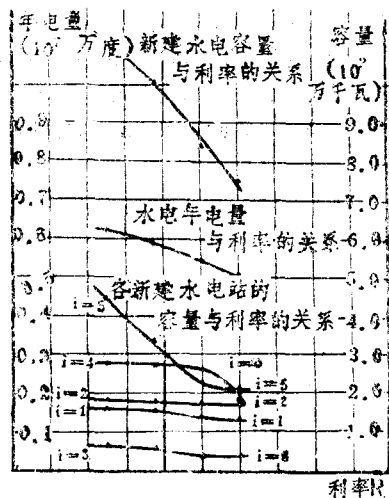


图 3

节), 对 X 的每一初始点约需 CPU 时间 30 分钟。

由于水电站群装机容量选择牵涉面十分广泛, 约束条件非常复杂, 加之又受多种条件和因素的限制, 本文对输电线路投资、不同保证时间的电能应采用不同电价等问题没作探讨, 因此, 在应用该模型的解时, 还需做补充分析; 另一方面, 模型也有待进一步完善。

(二) 结论

实例分析计算表明, 本文建立的模型具有独特的优点:

1. 第一次同时反映了水电站修建时序、水电的季节性、动态电力电量平衡等因素, 弥补了现有研究中的不足。本文采用的目标函数也较现有文献更全面, 更具体。不仅如此, 该模型还使参加优化的自变量最少, 所以能够顺利克服计算上的困难。理论分析和实例计算都表明, 它能够应用于多流域的大型混合电力系统。

2. 多个水电站的群体的建成, 一般需要数十年, 因此, 若不考虑或只考虑一次投资平衡, 就难以满足实际的需要。所以, 本文提出了多时段投资平衡, 导出了反映年利率、物价上涨率、电站修建时序及其投资分配特点的可变投资计算系数矩阵, 使有关计算变得非常简单。

3. 巧妙地将各水电站的下游最小流量约束转化为各库水位约束, 既比较符合实际, 又使优化补偿调节的自变量最少, 计算量小。

4. 灵活性大, 通用性强。只需改变 T_0 或 ZN_{i4} 或 ZL_{i4} , 该模型便可进行多时序或多正常高水位或多死水位方案的分析计算, 并且可进行多种参数的灵敏度分析。

参 考 文 献

- [1] Yakowitz, S., Dynamic Programing Applications in Water Resources, Water Resour. Res 18 (4), Aug. 1982.
- [2] Luss, H., Operations Research and Capacity Expansion Problems: A survey. Op. Res., 30(5), Sep-Oct. 1982.
- [3] Kuiper, J. and L. Ortolano, A Dynamic Programing—Simulation Strategy for the Capacity Expansion of Hydroelectric Power Systems, Water Resour. Res., 9(6), Dec. 1973.
- [4] M. 阿佛里耳, 非线性规划, 分析与方法, 下册, 31—33, 李元熹等译, 上海科学出版社, 1980. 1。
- [5] 万耀青、梁庚荣、陈志强, 最优化计算方法常用程序汇编, 129—140, 工人出版社, 1983, 9。