

水电站机组台数优化选择

鄢建华

(成都科技大学水电学院)

选择水电站水能参数时,当优化选定了装机容量之后,应按系统工程最优化原则选择机组台数或单机容量。

我们知道,选择单机容量要考虑:单机容量占电力系统总容量的比重;电力系统运行的可靠性与灵活性;该电站和系统近期及发展的规模;电站和水库运行方式与机组检修要求;枢纽地形、地质和水文条件对厂房布置的限制;综合利用要求;机组制造和安装的技术水平以及交通运输条件等等。迄今国内外在选择机组台数时都认为尽可能选用大的单机容量〔1,2〕,即机组台数尽可能少些,在经济上是合算的。导致这一结论的原因,主要是由于在进行方案的技术经济比较时,所采用的常规选择方法对年发电量增减等因素考虑不足,而仅考虑“减小水电站投资”一个因素之故。

文献〔3〕“水电站机组台数选择的经济准则”一文中,最优机组台数 n^* (注)按下式计算:

$$n^* = \frac{d}{2a} = \frac{2\sqrt{aC_h}}{2a} = \sqrt{\frac{C_h}{a}} \quad (1)$$

式中 d ——随单机引用流量 Q 变化而不包括“一般费用”在内的工程费用(投资),

当 Q 变为电站最大引用流量 Q_1 时 d 变为 D (元);

a ——包括受机组台数变化影响的土建工程费(如厂房等)在内的单机(设备)费用(元/单机);

C_h ——水电站工程总费用扣去“设备费用和一般费用”后的水电工程费用(元)。

不难看出,公式(1)同样只反映了“工程投资(费用)”一个因素。

再者,机组台数 n 是一个只能取正整数的离散型变量,不能构成连续函数,但文献〔3〕的作者却采用了对机组台数 n 微分求极值的办法导出公式(1),这显然也是不合适的。

目前,有的也以电站获得的年电量最大作为最佳经济效益准则来选择机组台数,显然,这也只考虑了年发电量一个因素。

作者提出应从系统工程最优化的观点出发,在选择机组台数时既要考虑投资尽可能减少,又要考虑年发电量最大或年损失电量最小。而且,应采用离散型整变量函数的数学模型来求极值。

如选择机组台数少或单机容量大的方案,固然可减少投资,若大机组出事故时,对

注:文献〔3〕符号 P^* 改为 n^* ,以便和本文符号统一。

电力系统的影响——损失的电能增大，即年电能损失费用也随之增大。故作者认为应以“工程投资的年费用和年电能损失费用之和为最小”，作为最优化准则来选择机组的台数。

首先推求机组事故引起的年电能损失费用 y_1 的表达式。

水电站每一年时间可划分为实际带负荷运行时间、待命运行时间、故障停运时间、计划检修和维修时间。前两项称为可用时间；后两项称为不可用时间。则“一年时间=可用时间+不可用时间”，令设备可用率为 $\bar{P}$ ：

$$\bar{P} = \frac{\text{可用时间}}{\text{可用时间} + \text{不可用时间}}$$

电站运行期应尽可能增大可用率 $\bar{P}$ ，美国 1971 年至 1980 年常规水电机组平均可用率为 95.2%〔4〕。通常采用的故障停运率为 Q ：

$$Q = \frac{\text{故障停运时间}}{\text{实际带负荷运行时间} + \text{故障停运时间}}$$

美国统计十年内常规水电机组每年平均故障停运率 $Q = 1.8\%$ 〔4〕，则机组正常（实际）运行率 $P = 98.2\%$ ；每年计划检修和维修停运时间，据运行统计资料常规水电机组为 14 天〔4〕。

当任一台或数台机组发生事故时不影响其余机组正常运行，这种互相独立事件同时发生的概率等于它们每个事件发生概率的乘积。今以装四台机组或 n 台机组的水电站来说明：

四台机组同时正常运行的概率 (P)

$$(P) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = P^4 \quad (2)'$$

n 台机组同时正常运行的概率 (P)

$$(P) = C_n^0 P^n \cdot Q^0 = P^n \quad (2)$$

三台机组正常运行、一台机组事故同时发生的概率 (P)

$$(P) = P_1 Q_2 P_3 P_4 + P_1 P_2 Q_3 P_4 + P_1 P_2 P_3 Q_4 + Q_1 P_2 P_3 P_4 = 4 P^3 Q \quad (3)'$$

$(n-1)$ 台机组正常运行、一台机组事故同时发生的概率 (P)

$$(P) = C_n^1 P^{n-1} Q \quad (3)$$

同理，四台机组同时发生事故的概率 (P)

$$(P) = Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4 = Q^4 \quad (4)'$$

n 台机组同时发生事故的概率 (P)

$$(P) = C_n^n P^{n-n} Q^n = Q^n \quad (4)$$

设单机容量为 $N_{\text{单}}$ ，装机容量为 $N_{\text{装}}$ ，水电站机组台数为 n ，一年时间扣去“待命运行时间和计划检修维修时间”后的总时间为 T 小时。据 (3) 至 (4) 式，因机组事故可能引起的水电站总的年电能损失 ΔE 按下式计算：

$$\begin{aligned}
\Delta E &= T \cdot [C_n^1 P^{n-1} Q \cdot N_{\text{单}} + C_n^2 P^{n-2} Q^2 \cdot 2N_{\text{单}} + C_n^3 P^{n-3} Q^3 \cdot 3N_{\text{单}} \\
&\quad + C_n^4 P^{n-4} Q^4 \cdot 4N_{\text{单}} + \dots + Q^n \cdot nN_{\text{单}}] \\
&= T \cdot \left[\frac{n!}{(n-1)!1!} P^{n-1} Q \cdot \frac{N_{\text{装}}}{n} + \frac{n!}{(n-2)!2!} P^{n-2} Q^2 \cdot 2 \frac{N_{\text{装}}}{n} \right. \\
&\quad + \frac{n!}{(n-3)!3!} P^{n-3} Q^3 \cdot 3 \frac{N_{\text{装}}}{n} + \frac{n!}{(n-4)!4!} P^{n-4} Q^4 \cdot 4 \frac{N_{\text{装}}}{n} + \dots \\
&\quad \left. + Q^n \cdot n \frac{N_{\text{装}}}{n} \right] \\
&= T N_{\text{装}} \left[\frac{(n-1)!}{(n-1)!1!} P^{n-1} Q + \frac{2(n-1)!}{(n-2)!2!} P^{n-2} Q^2 + \frac{3(n-1)!}{(n-3)!3!} P^{n-3} Q^3 \right. \\
&\quad \left. + \frac{4(n-1)!}{(n-4)!4!} P^{n-4} Q^4 + \dots + Q^n \right] \\
&= T N_{\text{装}} \left[P^{n-1} Q + \frac{(n-1)}{1!} P^{n-2} Q^2 + \frac{(n-1)(n-2)}{2!} P^{n-3} Q^3 \right. \\
&\quad + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)}{3!} P^{n-4} Q^4 + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{4!} P^{n-5} Q^5 + \dots \\
&\quad \left. + Q^n \right] \\
&= T N_{\text{装}} K
\end{aligned} \tag{5}$$

式中 K —— 方括号内的取决于 n 、 P 、 Q 值的系数。

于是年电能损失费用 y_1 按下式计算：

$$y_1 = \Delta E \cdot b = T N_{\text{装}} K \cdot b \tag{6}$$

式中 b —— 平均每度电的纯收入（元/千瓦·小时）。

再写出工程投资年费用的表达式 y_2 。

在水电站装机容量一定时，其总投资可由随机机组台数变化而变化的部分和固定不变的部分组成，即总投资为：

$$\begin{aligned}
C &= C_0 + C_1 N_{\text{单}} \cdot n = C_0 + C_1 N_{\text{装}} \\
&= C_0 + an
\end{aligned} \tag{7}$$

式中 C_0 —— 不受机组台数变化影响的工程总投资中的固定不变部分；

n —— 任一方案的机组台数；

C_1 —— 任一方案的增加千瓦投资（元/千瓦）；

$a = C_1 N_{\text{单}}$ —— 任一方案的单机投资（费用）（元/单机）；

$N_{\text{单}} = \frac{N_{\text{装}}}{n}$ —— 任一方案的单机容量（千瓦）。

公式（7）可用图 1 表示。

于是在方案比较时计算工程投资的年费用 y_2 ，可以只考虑其随机机组台数变化而变化的投资部分。在不考虑货币时间价值的情况下，年费用 y_2 可按下式计算：

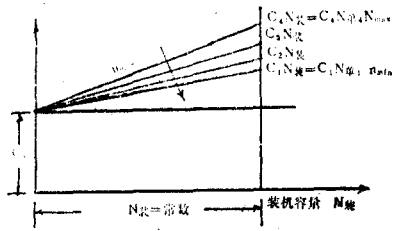


图 1

$$y_2 = 0.05an \quad (8)$$

最后, 以工程投资年费用 y_2 和年电能损失费用 y_1 之和为小作准则的数学模型, 可以表达如下:

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= TN_{\text{装}}Kb + 0.05an \\ &\Rightarrow \min \quad (\text{目标函数}) \end{aligned}$$

$$n_{\max} \geq n \geq n_{\min} \quad (\text{约束条件}) \quad (9)$$

【案例分析】

今有一水电站已选择装机容量为 240 万千瓦。根据其所在电力系统内各水电站运行统计资料分析, 可取故障停运率 $Q=0.02$, 正常运行率 $P=0.98$ 。由于地形地质条件、航运和泄洪要求, 该电站站址处最大可能布置的机组台数不能超过 12 台, 即 $n_{\max}=12$; 因制造水平和交通运输限制, 单机容量不能大于 60 万千瓦, 即 $n_{\min}=4$ 。经过各机组台数方案的投资计算, 其随机机组台数变化而变化的投资部分各项指标, 列在表 1 中。

表 1

方案序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
指标名称									
机组台数 n	$n_{\min}$ 4	5	6	7	8	9	10	11	$n_{\max}$ 12
单机容量 $N_{\text{单}}$ (万千瓦)	60	48	40	34.3	30	26.67	24	21.82	20
单机投资 a (万元)	11500	9210	7686.7	6617.14	5797.5	5175.56	4680	4275.45	3941.67
增加千瓦投资 $\frac{a}{N_{\text{单}}}$ (元/千瓦)	191.67	191.875	192.17	192.92	193.25	194.06	195.00	195.94	197.08
随机机组台数变化的 投资 na (万元)	46000	46050	46120	46320	46380	46580	46800	47030	47300

采用列表法求解数学模型 (9) 的最优机组台数 n^* 。

首先计算出 K 值及 $TN_{\text{装}}b$ 值。以方案 1 为例来说明 K 值的计算:

当 $n=4$, $P=0.98$, $Q=0.02$ 时, 则

$$\begin{aligned} K &= P^{4-1}Q + \frac{(4-1)}{1!} P^{4-2}Q^2 + \frac{(4-1)(4-2)}{2!} P^{4-3}Q^3 + \frac{(4-1)(4-2)(4-3)}{3!} P^{4-4}Q^4 \\ &= P^3Q + 3P^2Q^2 + 3PQ^3 + Q^4 \end{aligned}$$

并将此式代入数学模型 (9) 中。

大型水电站采用作者建议的这一方法来优化选择水电站机组台数, 尤具有重大意义。

$$=0.0188238+1.152\times 10^{-3}+2.35\times 10^{-5}+1.6\times 10^{-7}$$

$$=0.01999946。$$

一般包含 Q^0 以上的含 Q 高阶项可以忽略不计。同理算出各方案的 K 值列在表 2 中。

又取平均一个月小时数为 8760/12 小时。根据运行统计资料常规水电站一台机组计划检修和维修时间约 15 天到 20 天,再适当加上待命运行时间,统计共取一个月或 730 小时,亦即可取 $T=(8760-730)=8030$ 小时。此外,取水电平均每度纯收入为 5 分。于是

$$TN_{\text{装}b}=8030 \text{ 小时} \times 240 \times 10000 \text{ 千瓦} \times \frac{5}{100} (\text{元/度}) = 96360 \text{ 万元}。$$

今将各方案的 y_2 、 K 、 y_1 及 y 值列表计算如表 2 所示。由表 2 不难看出, y 不是一条连续光滑曲线,而是离散型无规律变化的。但 y_2 随 n 的增大而增大, y_1 随 n 的增大而减小都是有规律的。

表 2

方案序号 n	1	2	3	4
指标名称	4	5	6	7
$y_2=0.05an$ (万元)	2300	2302.5	2306	2316
系数 K	0.01999946	0.01999272	0.01984798	0.01977449
$y_1=TN_{\text{装}b} \cdot K$ (万元)	1927.15	1926.50	1912.55	1905.47
$y=y_1+y_2$ (万元)	4227.15	4229.0	4218.55	4221.47

方案序号 n	5	6	7	8	9
指标名称	8*	9	10	11	12
$y_2=0.05an$ (万元)	2319	2329	2340	2351.5	2365
系数 K	0.01968785	0.01958876	0.01947757	0.01935496	0.01922148
$y_1=TN_{\text{装}b} \cdot K$ (万元)	1897.12	1887.57	1876.86	1865.04	1852.18
$y=y_1+y_2$ (万元)	4216.12*	4216.57	4216.86	4216.54	4217.18

由表 2 我们得出最优机组台数 $n^*=8$, 其 $y^*=4216.12$ 万元。如果按通常总投资尽可能小的原则而选择 $n=4$ 的方案, 则实际上每年反而多出费用 11.03 万元。以通常采用的计算寿命 50 年计, 则 50 年总共多出费用 551.5 万元。

这一案例显然还说明当求得 n^* 后, 如在小于 n^* 并最靠近 n^* 的方案中, 有 y 值和 y^* 相差甚小的方案, 如本例中的 $n=6$ 的方案, 也是可能考虑作为选用方案的。

当方案数量较大时, 不难编出程序用电子计算机进行计算。

最后应该指出, 除事故引起的年电能损失 ΔE 之外, 由于各方案的单机容量不同, 故机组效率, 水电站运转特性曲线、受阻容量、吸出高度、最小流量下机组承担负荷情况等也不同, 因而各方案的年发电量不同并造成了年发电量的差值, 也不难将此差值作为变动方案时的年电能损失 $\Delta E'$, 于是公式 (6) 变成

$$y_1=(\Delta E+\Delta E')b=(TN_{\text{装}K}+\Delta E')b \quad (6)'$$

参 考 文 献

- [1] 奚家则, 从机组设计方面提高水电工程经济效益 (国外水力发电), 水力发电, 1984, No 6. P57
- [2] 水电站机电设计手册编写组, 水电站机电设计手册 (水力机械), p36, 水利电力出版社, 1983年
- [3] R. Bahamonde, Economic criteria in selecting the number of units for a hydro Plant, Water Power & Dam Construction, July 1984, P43-P45
- [4] 水电部科技情报研究所, 提高设备可用率是挖潜的重要内容, 国外电力消息, 1982年第8期

《四川水力发电》第九次编委会会议在朝阳湖举行

《四川水力发电》第九次编委会于一九八五年八月二十日~二十一日在蒲江朝阳湖招待所举行。除个别编委因公务不能出席外, 其他十八位编委和编辑都准时到会。应邀出席的有省水电工程学会付理事长蔡家鲤、曹秉铨, 理事聂振伟和省科协王丕绪等同志共二十三人。编委会主任委员盛洪文, 付主任委员兼主编李远惠, 付主编王士天主持了会议, 李永新同志代表编辑部汇报了一九八五年上半年工作情况、本次会议讨论的重要议题和提高刊物质量的初步意见。与会同志除对一九八五年第二期拟采用稿件进行评审外, 并着重讨论了如下几个问题:

1. 关于半年刊改为季刊问题——与会同志一致认为, 由于本刊周期过长, 作者所投稿件, 经审查到刊出, 一般多在一年或一年半的时间, 影响稿件的时效, 新内容也变得陈旧, 无疑会使投稿者望而却步, 稿源枯竭, 难以保证刊物质量, 不能达到“限国内发行”的要求。会议同意于一九八六年改为季刊, 篇幅压缩到80页, 并报请学会和省科协批准。

2. 关于定价问题——目前因纸张、印刷等费用提高, 大多数刊物相继提价。与会同志讨论认为, 本刊主要进行学术交流, 并着重社会效益, 明年改季刊后亦为0.80元。会员定价, 明年调为0.4元, 个人定价与单位定价相同。

3. 关于提高刊物质量问题——提高刊物质量, 关键在于组稿和审稿。关于组稿问题, 应结合当前水电建设中存在的重大问题, 并针对四川特点有目的地、主动地组织稿源。同时, 希望各专委给予大力支持, 号召大会员踊跃投稿。对每篇来稿原则上应委托两人以上审稿。在适当时期召开编委会集中审查稿件。编辑部加强编校, 今后少出或不出勘误表, 积极配合印刷厂提高印刷质量, 使本刊办得更好, 以扩大学报的影响。为更好地为四化服务, 《地方水电建设》栏目今后每期宜有1/3~1/5篇幅刊载地方水电建设方面的文章。编辑部应在专县和有关部门聘请通讯员, 以沟通信息, 发掘稿源, 扩大本刊发行范围。

5. 关于稿酬标准与发行等问题, 会上都进行了认真讨论, 由编辑部拟行具体办法报学会审查。

唐 1985.8.30.