

高等学校教材

(第二版)

水电站经济运行原理

华中理工大学 张勇传 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校教材

水电站经济运行原理

(第二版)

华中理工大学 张勇传 主编

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书论述水电站经济运行的基本理论和方法,分基础篇和应用篇两部分。基础篇中有三章,即第一章水电站经济运行概述,第二章数学基础,第三章电厂动力特性;应用篇中有三篇,即第四章水电站厂内经济运行原理,第五章电力系统中水、火电日负荷分配原理,第六章水库优化调度原理。

本书为高等学校能源动力工程类专业教材,也可作为水力发电工程学科研究生的选修课教材,还可供其他有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站经济运行原理/张勇传主编. —2版. —北京:中国水利水电出版社, 1998

高等学校教材

ISBN 7-80124-656-X

I. 水… I. 张… Ⅲ. 水力发电站-运行/高等学校-教材 N.TV737

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第03747号

书 名	高等学校教材 水电站经济运行原理(第二版)
作 者	华中理工大学 张勇传 主编
出 版	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京密云红光照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	7870×1092毫米 16开本 14.75印张 344千字
版 次	1981年6月第一版 1998年10月第二版
印 数	1998年10月北京第三次印刷
定 价	9211—10210册 14.50元

第一版前言

随着我国水电事业的发展，投入运行的大中型水电站日益增多，搞好水电站经济运行工作，已成为节约水电能源的主要措施。从国内外运行经验来看，水电站的经济运行能充分利用水能、挖掘水库潜力、增发水电。这对节约能源有着十分重要的意义。

考虑到我国的能源条件和电力系统的特点，发挥电力系统的经济效益是既要研究系统负荷的经济分配，又要注意水能资源的综合利用，节约原煤。水电站经济运行越来越引起人们的关注，对此课题的研究和解决显得更加迫切。高等院校有关专业设置“水电站经济运行”课程，对培养这方面的人才，将起很大的促进作用。

参加本书编写工作的有：华中工学院虞锦江、梁年生，武汉水利电力学院冯尚友、李钰心等同志。冯尚友同志编写绪论、第五章的一、二、三节及附录Ⅰ（动态规划），李钰心同志编写第四、七章，虞锦江同志编写第一、二、六章、附录Ⅲ（概率论及数理统计简介），梁年生同志编写第三章、第五章的第四节，第二章中第七节的一部分及附录Ⅱ（变分法）。全书由虞锦江副教授主编，冯尚友教授主审。在编写过程中，张勇传副教授提了宝贵意见，在此表示感谢。

由于编写者水平所限，书的内容、论点、组织等方面可能存在缺点和错误，希望读者提出批评和指正。

编 者

1980年12月30日

第 二 版 前 言

正在兴建的三峡水电站以及一系列水电工程，将推动全国统一大电网的形成。水电作为可再生的洁净能源在我国的能源结构中将继续扮演重要角色，这不仅要求我们学习和掌握先进的水力发电科学技术，而且要学习和掌握现代化的科学管理方法。

本书是遵循水电工程类全国第四轮教材编写要求，在1984年华中工学院主编的《水电站经济运行》基础上新编的。《水电站经济运行原理》力求阐明电力系统中水电站经济运行的基本概念、基本知识与基本方法，它作为能源动力工程类专业的一门技术基础课，又是水力发电工程学科的一门专业课，担负着沟通与加强数理基础与专业知识之间的联系的重任。

本书由张勇传主编，刘鑫卿、权先璋、骆如蕴参编（其中第一章、第五章由刘鑫卿（兼副主编）编写，第三章、第四章由权先璋编写，第二章、第六章由张勇传与骆如蕴合作编写），承武汉水利电力大学戴国瑞教授审阅，提出了很多中肯宝贵意见，作者在此表示诚挚的谢意。本书得到水利部水电工程类专业全国教学指导委员会沈祖诒、孙振天等许多教授专家的关心，对本书的编写起了极大的促进作用，中国水利水电出版社奚广秀等在编审成书过程中付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心的感谢。

作者愿望得到读者的批评指正。

编 者

1997.7.1

目 录

第二版前言

第一版前言

第一篇 基础篇	1
第一章 水电站经济运行概述	1
第一节 水电站在电力系统中的作用	1
第二节 水电站在水利资源系统中的作用	16
第三节 水电站经济运行方式	22
第二章 数学基础	32
第一节 概率的基础知识	32
第二节 数理统计基础知识	49
第三节 数学规划	63
第三章 电厂动力特性	87
第一节 水电厂动力特性	87
第二节 机组段动力特性曲线	92
第三节 原型水轮发电机组的效率试验	96
第四节 抽水蓄能电站和潮汐电站的动力特性	108
第五节 水库特性曲线与特征参数	113
第六节 水电站下游水位特性	115
第七节 火电机组及火电厂的动力特性	116
第八节 机组动力特性曲线的拟合	121
第二篇 应用篇	124
第四章 水电站厂内经济运行原理	124
第一节 水电站厂内经济运行的数学准则	124
第二节 固定机组间的最优负荷分配	125
第三节 电厂开停机计划——时间最优问题求解	139
第四节 最优负荷分配中的误差分析	142
第五章 电力系统中水、火电日负荷分配原理	150
第一节 日负荷分配原则	150
第二节 必要条件和充分条件	154
第三节 工程应用分析	159
第四节 梯级水电厂调峰日运行方式	173
第五节 短期优化运行实时控制	181
第六章 水库优化调度原理	190
第一节 水库调度与调度规则函数	190
第二节 发电水库优化调度	195

第三节	优化计算与凸动态规划	212
第四节	库群优化调度	215
第五节	综合利用水库优化调度	224
参考文献		228

第一篇 基础篇

第一章 水电站经济运行概述

第一节 水电站在电力系统中的作用

一、水电能源的特点

(一) 可再生能源

水电能源指水电站生产电能所必需的一次能源。是河流和潮汐中所携带的天然水能，又称水力资源。用单位时间内水流的功率表示，常以 kW 为单位。

1. 总量

河流天然水流功率 N_r 与被开发河段的落差 H (m)、天然流量 Q (m^3/s) 成正比例，可用式 (1-1) 表示如下

$$N_r = 9.81QH(kW) \quad (1-1)$$

潮汐天然水流功率的计算，只须用潮差代替式 (1-1) 的落差即可。

式 (1-1) 中 Q 为天然流量。因为天然流量常随时间改变，所以计算水电能源总是采用多年平均流量。中国的水电能源极为丰富，据 1977~1980 年进行的第 4 次水能资源普查估计，全国河流水电能源理论蕴藏量约为 6.76 亿 kW；可开发利用的约 3.78 亿 kW，居世界首位，但直到 20 世纪 80 年代已开发的比例还很小，仅为 8%。

表 1-1 列出我国分省水电能源蕴藏量。

表 1-1 全国分省 (区) 水能蕴藏量

地区、省 (区)	水 能 蕴 藏 量			地区、省 (区)	水 能 蕴 藏 量		
	按发电功率计 (万 kW)	按年发电量计 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)		按发电功率计 (万 kW)	按年发电量计 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)
全 国	67604.71	59221.8	100.0	华东地区	3004.88	2632.3	4.4
华北地区	1229.93	1077.4	1.8	上海、江苏	199.10	174.4	0.3
京、津、河北	220.84	193.5	0.3	浙 江	606.00	530.9	0.9
山 西	511.45	448.0	0.8	安 徽	398.08	348.7	0.6
内 蒙 古	497.64	435.9	0.7	福 建	1045.91	916.2	1.5
				江 西	682.03	597.5	1.0
				山 东	73.76	64.6	0.1
东北地区	1212.66	1062.3	1.8	中南地区	6408.37	5613.8	9.5
辽 宁	175.19	153.5	0.3	河 南	477.36	418.2	0.7
吉 林	297.98	261.0	0.4	湖 北	1823.13	1597.1	2.7
黑 龙 江	739.49	647.8	1.1	湖 南	1532.45	1342.4	2.3
				广 东	823.60	721.5	1.2
				广 西	1751.83	1534.6	2.6

续表

地区、省(区)	水 能 蕴 藏 量			地区、省(区)	水 能 蕴 藏 量		
	按发电功率计 (万 kW)	按年发电量计 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)		按发电功率计 (万 kW)	按年发电量计 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)
西南地区	47331.18	41462.1	70.0	西北地区	8417.69	7373.9	12.5
四 川	15036.78	13172.2	22.2	陕 西	1274.88	1116.8	1.9
贵 州	1874.47	1642.0	2.8	甘 肃	1426.40	1249.5	2.1
云 南	10364.00	9078.9	15.3	青 海	2153.66	1886.6	3.2
西 藏	20055.93	17569.0	29.7	宁 夏	207.30	181.6	0.3
				新 疆	3355.45	2939.4	5.0

注 1. 本表按单站 500kW 以上电站统计。

2. 根据年发电量计算占全国的比重。

3. 尚未包括台湾省数据。

表 1-2 列出我国分水系水电能源蕴藏量和可开发量。

表 1-2 全国分水系水能蕴藏量

地区、省(区)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)	地区、省(区)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	占全国比重 (%)
全 国	37853.24	19233.04	100.0	中南地区	6743.49	2973.65	15.5
华北地区	691.98	232.25	1.2	河 南	292.88	111.63	0.6
京、津、河北	183.71	41.77	0.2	湖 北	3309.47	1493.84	7.8
山 西	263.98	106.98	0.6	湖 南	1083.84	488.91	2.5
内 蒙 古	244.29	83.50	0.4	广 东	638.99	239.80	1.3
				广 西	1418.31	639.47	3.3
东北地区	1199.45	383.91	2.0	西南地区	23234.33	13050.36	67.8
辽 宁	163.34	55.85	0.3	西 川	9166.51	5152.91	26.8
吉 林	432.92	109.55	0.6	贵 州	1291.76	652.44	3.4
黑 龙 江	603.19	218.51	1.1	云 南	7116.79	3944.53	20.5
				西 藏	5659.27	3300.48	17.1
华东地区	1790.22	687.94	3.6	西北地区	4193.77	1904.93	9.9
上海、江苏	9.75	3.10	—	陕 西	550.71	217.04	1.1
浙 江	465.52	145.63	0.8	甘 肃	910.97	424.44	2.2
安 徽	88.15	26.09	0.1	青 海	1799.08	772.08	4.0
福 建	705.12	320.20	1.7	宁 夏	79.50	31.62	0.2
江 西	510.86	190.54	1.0	新 疆	853.51	459.75	2.4
山 东	10.82	2.38	—				

注 1. 本表按单站 500kW 以上电站统计。

2. 根据年发电量计算占全国的比重。

3. 尚未包括台湾省数据。

2. 再生规律

水电能源是水利资源的一部分。天然河流的水利资源逐年可以得到天然降水的补给而再生，它与水文气象情况相关联，年径流具有大致以年为周期的丰水期、枯水期交替变化，以水文现象的循环作为年径流计算起迄时间的年度称为水文年度，划分方法有两种：其一，以补给河流水源自然转变的时间为水文年度的起始日期，转变指从专靠地下水源补给转变到地面水源增多；其二，选择与地面水文气象相适应的时间为起始日期，即指降水量极少，地面径流接近停止的日期。中国一般以3月1日作为水文年度的起始日期。

3. 提高经济性的途径

充分利用水电能源生产电能是近代水力发电工程的核心内容。提高经济性的基本途径有以下三方面：一是工程措施，通过规划、设计和施工合理兴建水力发电站，从水利资源综合利用目标出发，制定水电站开发方案，最大限度地开发水力资源；二是水电站经济运行，从电力系统安全、优质、经济发供电的目标出发，制定水电站的最优运行方式，以一定的水电能源获取水电站最大发电量；三是电力系统经济调度，从电力系统安全、优质和经济发供电的目标出发，制定电力系统的最优调度方式，以一定的水电能源和其他一次能源获取电力系统最大发电量。

(二) 可调节能源

水电能源的调配调节是指人为有目的地改变河川天然径流，对其水量或水位采取在时间和空间上重新分配或控制的措施。河川天然径流量在年内各季及年际间的分配规律与水利综合利用目标一般不符，地区分布也不平衡。人为利用水库（或湖泊）按用水要求蓄丰补枯或控制水位，有时也利用水库滞蓄洪水减免下游洪灾，前者属于兴利调节，后者属于防洪调节。这是在某一周期内（如一年）使水量按时间需要重新分配。按周期长短划分，有多年调节、年调节、季调节和日调节等。对水电能源在空间上有以下调配调节措施：人为利用泵站按用水要求从水量丰沛地区（或流域）提水往缺水地区输送，这是跨地区（流域）的调济引水；有时利用水电站的引水建筑物穿越分水岭在邻近河流间形成水电站水头，这属于跨流域开发；或者利用水电站的进水建筑物，在上游两岸修建伸向相邻流域的集水渠以扩大所控制的流域面积，为水电站截取更多的地面径流，这属于集水网道式开发。

1. 水量调节

利用水库集中落差形成水头并拦蓄一定量的河川天然径流可以调节流量，使水量按时间需要重新分配。主要方式是水库在丰水期蓄水（在高水位时期可能弃水），在其他时期按用水需要供水。水库蓄水供水全过程所经历的时间称为水库调节周期。即水库蓄水时水位由死水位上升至正常蓄水位；开始供水后又从正常蓄水位下降至死水位，直至下一次蓄水开始前为止的一次循环周期的历时。调节周期是确定水库调节性能和水电站动力特性的重要指标。按周期长短划分有多年调节、年调节、季调节和日调节等。多年调节水库要经过若干个丰水年才能蓄满，所蓄水量往往分配在几个枯水年里使用。由于调节周期长的水库容积也大，所以多年调节水库同时也可进行年调节、季调节和日调节，这样综合应用长期调节和短期调节，可以减少或完全消除因弃水造成的水量损失。

库容系数是表示水库容积大小的相对指标，是水库有效库容与坝址处河流多年平均年

水量的比值。可用式 (1-2) 表示如下

$$\beta = \frac{V}{W} \quad (1-2)$$

式中 β ——库容系数;

W ——多年平均年水量;

V ——水库有效库容。

当 $V < 0.02W$ 时为日调节; 当 $V = (0.02 \sim 0.20)W$ 时为季调节; 当 $V = (0.30 \sim 0.50)W$ 时为年调节; 当 $V > 0.5W$ 时为多年调节。

用调节系数表示径流调节程度的高低, 是调节流量与河流多年平均流量的比值。可用式 (1-3) 表示如下

$$\alpha = \frac{Q_H}{Q_0} \quad \text{或} \quad \alpha = \frac{A_H}{W} \quad (1-3)$$

式中 α ——调节系数;

Q_0 ——多年平均流量;

Q_H ——供水期平均调节流量;

W ——多年平均年水量;

A_H ——年总保证需水量。

天然水量被利用的程度称为水量利用系数。等于利用水量与全年总水量的比值, 用百分数表示。利用水量是指全年总的天然水量与径流调节过程中弃水量的差值。

水利水电枢纽群体之间, 利用各个枢纽间水文特性的不同及水库特性的差异, 可以进行径流的互相补偿以提高保证流量, 这被称为补偿调节, 能够更充分合理地利用水利资源。

在同一条河流上从上游到下游梯级开发, 可以布置一系列的串连水库。各水库之间有密切的径流联系, 上游水库的径流调节对下游水库有直接影响。为消除上游水库径流调节时给其他综合利用目标带来的不良影响, 可利用下游水库重新调节上游水库下泄的径流, 这被称为反调节 (或再调节)。例如水电站进行日调节时, 其下游河段水位和流速在一天内有剧烈变化, 可能造成对航运的不良影响, 这可以利用下游水库进行反调节加以解决。

2. 水头控制

水电站在发电过程中所引用的单位重量水体所携带的天然水能, 称作水电站水头, 以 m (米) 为计量单位。水电站的总水头, 又称毛水头, 等于水电站上游引水进口断面和下游尾水出口断面处的水位差、流速水头差与压强水头差之和, 可用式 (1-4) 表示如下

$$H_m = Z_u - Z_d + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \quad (1-4)$$

式中 Z_u 、 Z_d ——水电站上、下游计算断面处水位;

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$ 、 $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ ——上、下游计算断面处流速水头;

$\frac{p_1}{\gamma}$ 、 $\frac{p_2}{\gamma}$ ——上、下游计算断面处压强水头。

当近似认为上、下游计算断面处的压强等于大气压, 流速又很小而忽略不计 (例如未发电) 时, 其相应水头称作静水头, 等于上、下游水位差, 可用式 (1-5) 表示如下

$$H_{ij} = Z_u - Z_d \quad (1-5)$$

水电站在发电过程中所引用的单位重量水体在引水建筑物中的天然水能损耗，称作水电站水头损失，它包括水流通过引水建筑物产生的局部水头损失和沿程水头损失以 m (米) 为计量单位。采取一定的措施 (如改善流道形状，减小过流表面糙率等) 能够减小水头损失。通常发电时水电站水头是指总水头与水电站水头损失之差，称为净水头，可用式 (1-6) 表示如下

$$H_j = H_m - h_l$$

$$\approx H_{ij} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - h_l \quad (1-6)$$

式中 h_l ——水电站水头损失。

由于水电站上游水位、下游水位、水头损失和流速都是随流量而变化的，所以水头瞬时值与时段平均值有区别。同样，引用流量也有瞬时值与时段平均值的区别。图 1-1 示出了不同开发方式水电站的毛、静水头及它们的对应关系。

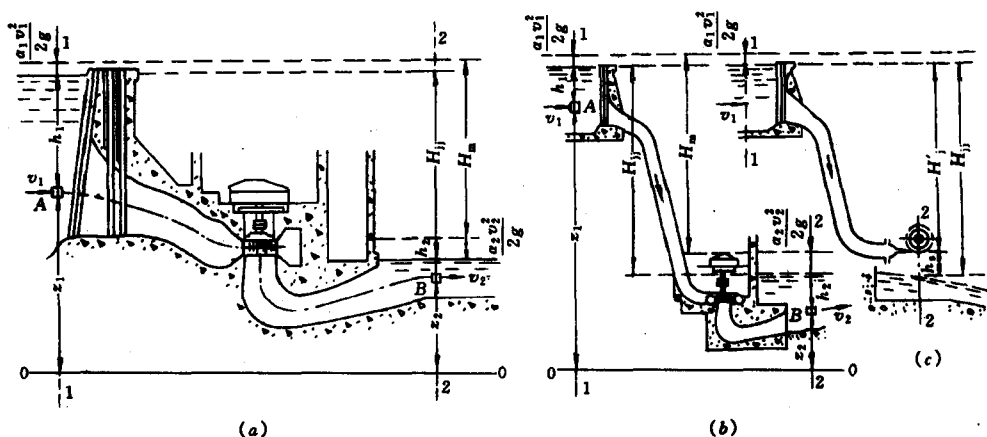


图 1-1 水电站水头

(a) 河床式水电站；(b) 引水式水电站；(c) 装有冲击式水轮机水电站

利用引水建筑物集中落差形成水电站水头，是坡度较陡河段开发利用水电能源的一种普遍的开发方式。有的利用相邻两河的水位差形成水头，进行跨流域开发。有时还可在引水建筑物进口附近的河上筑壅水坝抬高进水口水位以获得更高的水头。

利用水库集中落差形成水头并调节流量的过程中，增长水库保持高水位运行的时间，获得调节周期内最大的运行平均水头，对于提高年发电量有重要作用。特别是狭谷型河道水库，水头控制作用甚至可能超过流量调节所能增发的电量。减少进水建筑物和引水建筑物的水头损失，也是水头控制的重要方面。

3. 利用效率

利用水电能源生产电能，除了采取集中水头和调节流量的工程措施外，为实现能量形式的转换，必须使用成套机电设备，其中水轮发电机组最为重要。从水电站输入水电能源到水电站输送出电能，能量形式经过了从水能到旋转机械能到电能的转换环节。

水电站电力出力与所引用的天然水流出力之比称为水电站效率，以百分率表示。水电站效率随机组运行工况改变，可用下式（1-7）表示

$$\eta_z = \frac{N}{9.81Q_y H_j} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 η_z ——水电站效率；

N ——水电站电力出力，kW；

Q_y ——水电站引用流量， m^3/s ；

H_j ——水电站水头，m。

通常大型水电站的 η_z 值约为 80%~90%；中型水电站的 η_z 值约为 75%~85%；小型水电站的 η_z 值约为 65%~75%。

水电站出力指单位时间水电站实际发出的电力功率，以 kW 为单位，是水电站送往各输电线路的电力功率之和。由于其数值随电力系统负荷和河流径流的变化而改变，所以出力瞬时值与时段平均值有区别。把各时刻的出力（或时段平均出力）值按时序点绘成曲线，即可得到出力过程线，常用的是平均出力过程线，如月平均、旬平均和日平均出力过程线。

改善机组运行工况，提高水电站效率，从而增发水电站出力，是提高经济性的重要途径之一。

（三）可控制运行方式

水电站的运行方式是指，电力系统中由电力调度决定的水电站与其他电厂联合运用的工作方式，常用水电站在电力系统负荷图上的工作位置表示。工作方式决定了水电站的出力过程，从而影响电力系统的电力电量平衡结果。

1. 水库调度—水情自动化系统

在水库调节周期内，有计划地控制水库蓄、供水过程，达到以兴利除害和发挥水库工程经济效益为目标的科学决策及技术管理方法，称为水库调度。通过水库调度方案的制定和实施运用，逐时段协调供需矛盾，统筹解决资源综合利用、分配和各部门的经济利益，致使国民经济效益最大。同一电力系统中若干水电站水库的联合调度，及水电、火电和其他电源联合运用，可在满足各库综合利用要求的前提下，使水电站总发电效益最大，或使电力系统经济效益最大。

水情自动化系统应用遥测、通信和计算机技术进行库区和流域内水文气象要素的实时采集处理，可为水库调度提供可靠依据。编制水库调度方案主要利用长期水文信息资料；调度方案的实施应用过程中，主要利用中、短期水文气象信息，针对具体情况对调度方案作修改补充。

2. 机组自动化—计算机监控系统

由于电力系统负荷的随机性和径流的随机性，水电站出力的瞬时值总是变动着的。所以要求水力机组操作灵活，调节性能优越。以机组为被控对象，连接自动调节装置构成自动控制系统，称为机组自动化系统，是水电站运行控制机组工况的最主要技术手段。

计算机监控系统是采用计算机为自动调节器的自动控制系统。相对地未采用计算机则称为常规自动控制系统。现阶段按照水电站中计算机所起的作用及常规设备设置的程度，通常分成以下三种类型：以常规自动化系统为基础的计算机辅助监控系统（CASC）；以计算

机为基础的监控系统 (CBSC); 和以计算机及常规双重化配置的监控系统 (CCSC)。随着电力工业和计算机技术的发展, 原有的 CCSC 和 CASC 系统都朝向 CBSC 系统过渡。计算机监控系统的结构模式, 按功能配置和组成的特点, 可分为集中式、分散式、分层分布式和全分布式等类型。

二、电力系统对水电站的要求

(一) 容量平衡

任何瞬时电力系统必须保持由各电厂供应的总电力与各用户消费的总负荷相一致, 称为电力平衡。可用式 (1-8) 表示由大功率设备组成的发、供和用电的电力一次系统

$$S_{st} = \{G, B, X, L | \Sigma P = 0, \Sigma Q = 0\} \quad (1-8)$$

$$G = \{G_i | i \in (1, 2, \dots, n_g) = [n_g]\}$$

$$B = \{B_j | j \in (1, 2, \dots, n_b) = [n_b]\}$$

$$X = \{X_k | k \in (1, 2, \dots, n_x) = [n_x]\}$$

$$L = \{L_l | l \in (1, 2, \dots, n_l) = [n_l]\}$$

式中 G ——发电厂的集合;
 B ——变压器的集合;
 X ——输电线路的集合;
 L ——用电设备 (或负荷) 的集合;

n_g 、 n_b 、 n_x 、 n_l ——发电厂总数、变压器总数、线路总数、负荷总数;

$\Sigma P=0$ 、 $\Sigma Q=0$ ——电力平衡条件;

P 、 Q ——有功功率、无功功率, 可以写成:

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{gi} = \sum_{l=1}^{n_l} P_l + \Delta P$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} Q_{gi} = \sum_{l=1}^{n_l} Q_l + \Delta Q$$

式中 ΔP 、 ΔQ ——输配电设备的有功功率损耗、无功功率损耗;

P_g 、 Q_g ——发电设备的有功功率、无功功率;

P_l 、 Q_l ——用电设备的有功功率、无功功率。

电力系统中发电设备的电力生产能力称为发电设备的容量, 是全部发电机组额定功率的总和, 以 kW 为单位。它又是说明电力系统规模大小的主要指标, 有时也作为装机容量的简称。电力系统的总装机容量是指系统中全部电厂的装机容量的总和。一台机组的铭牌出力也称为额定容量, 是该机组的发电机按设计条件所允许的最大工作出力。

电力系统的最大负荷也是各电厂联合运行发供的最大出力, 其相应的设备容量称为最大工作容量。由于电厂的机组可能发生事故或需要检修而退出运行, 还由于负荷有可能随时增长超过原计划水平, 所以电力系统中还需要装设额外的容量以备补充动用, 称这部分容量为备用容量。它是为保证对用户的正常供电、分担最大负荷需要而额外增设的富裕容量。备用容量按任务性质划分, 一般包括三类:

(1) 负荷备用容量, 其准确数值和出现时间无法预知, 一般为系统最大负荷值的 2%~5%;

(2) 事故备用容量, 一般为系统最大负荷值的 8%~10%, 应不小于系统中最大机组的单机容量;

(3) 检修备用容量, 目的是保证系统中所有机组得以进行定期检修。

因此电力系统总装机容量决不能低于系统最大工作容量与系统备用容量之和, 可用式 (1-9) 表示如下

$$N_{xt} \geq N_{g\max} + N_{by} \quad (1-9)$$

式中 N_{xt} ——系统装机容量;

$N_{g\max}$ ——系统最大工作容量;

N_{by} ——系统备用容量。

1. 替代容量

水电站的容量指水电站的发电能力, 是水电站全部水轮发电机组额定功率的总和。具体分为水电站装机容量、水电站工作容量、水电站备用容量、水电站重复容量等。有时也把水电站装机容量简称为水电站容量。基于水电能源的优越性和水机组的特点, 水电站参与电力系统的容量平衡, 首先是承担最大工作容量和备用容量。由于这两部分容量都是正常发供电所必不可少的, 所以统称为必需容量。可用式 (1-10) 表示如下

$$N_{bx} = N_{g\max} + N_{by} \quad (1-10)$$

式中 N_{bx} ——必需容量;

$N_{g\max}$ ——最大工作容量;

N_{by} ——备用容量。

电力系统的必需容量可分装在多个电厂, 不过一定要保持总容量不变。如果某个电厂少装一部分必需容量, 则必须由另外的电厂多装相应数量的必需容量来替代。因此必需容量又称为替代容量。

2. 重复容量

重复容量装设, 在无调节或调节性能较差的水电站, 用以在洪水季节利用丰富的天然水量多发季节性电能。但在枯水季节这部分容量因水量不足而闲置, 不能替代火电站的装机容量, 因此称为重复容量。所以从设计角度讲, 水电站的总装机容量将包括必需容量和重复容量两部分, 可用式 (1-11) 表示如下

$$N_z = N_{bx} + N_{cf} \quad (1-11)$$

式中 N_z ——装机总容量;

N_{bx} ——必需容量;

N_{cf} ——重复容量。

水电站重复容量也就是系统重复容量。对于只有水电站、火电厂和核电厂作电源的电力系统, 系统总装机容量可用式 (1-12) 表示如下

$$\begin{aligned} N_z &= N_{bx} + N_{cf} \\ &= \sum N_{1g\max} + \sum N_{1by} + \sum N_{1cf} \\ &\quad + \sum N_{2g\max} + \sum N_{2by} + \sum N_{3g\max} + \sum N_{3by} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 N_1 、 N_2 、 N_3 ——水电、火电和核电。

3. 备用容量

系统负荷备用容量用以担负计划外的短时负荷。因为负荷变动总是时高时低，因此水电站分担负荷备用容量无须留出专门的备用库容（水量）。系统事故备用容量用以弥补电力系统因个别机组突发事故而造成的容量缺额。水电站分担系统事故备用容量需要留出库容（水量）。当设计事故备用容量所需水量占兴利库容的比重较大时，应设置专门的水库备用库容，其容积一般为事故备用容量工作 10~15 天所需的水量。备用库容常置于死水位以下。

系统和电站已经设置的装机容量，按所处的状态可分为受阻容量和可用容量两部分。发电机组运行中可能因某种原因，如因技术问题、因检修或因一次能源不足等，而不得不中断工作，退出运行或降低出力运行。这部分不能参加工作的容量称为受阻容量，其余可正常运行的容量称为可用容量。可用容量按负荷需要投入运行，正在运行的容量称为工作容量，其余称为待用容量。待用容量超过备用容量的那部分是空闲容量。可用式（1-13）表示以上容量平衡关系

$$\begin{aligned}N_z &= N_{ky} + N_{sz} \\&= N_{gz} + N_{dy} + N_{sz} \\&= N_{gz} + N_{by} + N_{kx} + N_{sz}\end{aligned}\quad (1-13)$$

式中 N_{ky} ——可用容量；

N_{dy} ——待用容量；

N_{sz} ——受阻容量；

N_{kx} ——空闲容量。

（二）可靠性

系统工程中可靠性的经典定义是：元件、设备和系统在规定条件下和预定时间内，完成预定功能的概率。电力系统的可靠性是指对用户不间断供应质量合格电力的连续程度。用概率方法分析电力系统的可靠性，通常是将电力系统划分为若干主要部分，如发电系统，输电系统，配电系统等，分别估计其可靠性。水电站作为电力系统的一种电源，在长期运行中所能提供的电力功率（出力），是随电力系统负荷和河流径流的变化而变化的。规划设计水电站时已选定了电力系统设计负荷水平，为估算未来长期运行中可能获得的水能及其变化规律，一般是通过长系列水文资料的频率分析，根据设计频率或设计保证率进行径流调节计算，从而确定水电站的保证出力。所谓保证率就是保证安全的概率。因此水电站保证出力可视为符合可靠性指标的电力功率。

可靠性分析中，元件被定义为组成系统的一个基本单元，并被视为一个不再分割的整体。一般系统元件分为可修复元件和不可修复元件两类。电力系统中的水电站属于可修复（恢复供电）元件。可修复元件使用可用度表示可靠性。可用度是长期运行时间中，元件处于或准备处于工作中的时间所占的比例。实际上是一个时间概率指标。国家规定设计不同等级的水电站应取不同的设计保证率值，同样可视为符合可靠性的时间概率指标。

1. 水电站保证出力

水电站保证出力指水电站在长期运行中符合设计保证率要求的一定时段内的平均出力。习惯上定义为符合设计保证率的供水期平均出力。实质上应理解为保证电量——径流调节给予保证的水电一次能源可提供的电量。用式（1-14）表示如下

$$\left. \begin{aligned} N_t &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m N_{gi} \\ P\{N_g \geq N_t\} &\geq P_t \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中 N_t ——水电站保证出力；

N_g ——时段平均出力；

i ——供水期时段编号数， $i=1, 2, \dots, m$ ；

P_t ——设计保证率；

P ——计算保证率。

保证出力所取时段的长度，视水电站的调节性能而定。对于无调节水电站和日调节水电站， N_t 是与设计保证率相应的日平均流量所能产生的出力；对于年调节水电站其 N_t 是符合设计保证率的相应设计枯水年供水期的平均出力。

2. 水电站设计保证率

水电站设计保证率指水电站运行期间达到预期设计要求的正常运行时间与预期总运行时间的比值，以百分率表示。可用式 (1-15) 表示如下

$$P_t = \frac{1}{T} T_z \times 100\% \quad (1-15)$$

式中 T ——总运行时间；

T_z ——正常运行时间。

有时用年保证率，它是投产后的长期运行期间，相当于平均每 100 年中水电站出力不小于保证出力的年数，以百分率表示。可用式 (1-16) 表示如下

$$P_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \times 100\% \quad (1-16)$$

式中 T ——正常运行年数，定义 $T = \begin{cases} 1 & \text{当 } N \geq N_t \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } N < N_t \text{ 时;} \end{cases}$

N ——计算出力；

N_t ——保证出力；

i ——运行年总数编号， $i=1, 2, \dots, m$ 。

对于径流式水电站常用水电站历时保证率，它是投产后多年运行期间，按设计要求正常运行的历时占运行总历时的比值，以百分率表示。可用式 (1-17) 表示如下

$$P_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \times 100\% \quad (1-17)$$

式中 t ——正常运行时段数，定义 $t = \begin{cases} 1 & \text{当 } N \geq N_t \text{ 时;} \\ 0 & \text{当 } N < N_t \text{ 时;} \end{cases}$

N ——计算出力；

N_t ——保证出力；

i ——运行时段编号， $i=1, 2, \dots, m$ ，时段长度为月、旬或日。