

水力蓄能发电站

苏联Г. М. 高尔登别尔格著

电力工业出版社

水力蓄能發電站

苏联Г. М. 高尔登別尔格著

電力工業部水力發電建設总局專家工作室翻譯

大連工学院水利系水能利用教研室校訂

電力工業出版社

內 容 提 要

本書研究日負荷範圍內水力蓄能方面的各項基本問題。除了專門研究水力蓄能發電站外，書中還研究了一般水力發電站設置水泵抽水進行水力蓄能的問題。

本書可供從事水電站的設計、施工和運行工作的工程師和技術員閱讀；同時也可供高等學校水工和水能兩專業的師生參考。

本書由水力發電建設總局專家工作室于靜安翻譯，由大連工學院水利系水能利用教研室主任陳可一和水能利用研究生王烈君、陳榮仁、陳鑑治、范景偉、許大來、夏允積等同志校訂。

Г. М. ГОЛЬДЕНБЕРГ

ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1953

水 力 蓄 能 發 電 站

根據蘇聯國立動力出版社1953年莫斯科版翻譯

電力工業部水力發電建設總局專家工作室翻譯

大連工學院水利系水能利用教研室校訂

676895

電力工業出版社出版(北京府右街26號)

北京市書刊出版登記證出字第082號

電力工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

737×1092 1/32 開本 * 印張 4 1/4 * 98 千字 * 定價(第10類)0.70 元

1957年11月北京第1版

1957年11月北京第1次印刷(0001— 1,100 冊)

前 言

党第十九次代表大会在关于苏联發展 第五个五年計劃 (1951—1955 年) 的指示中, 規定了五年內使發電站的总容量約增加一倍: 首先保証扩大火电站現有的企業, 同时水电站的容量应增加兩倍。

随着联合水电站和火电站的規模宏大的新电力系統的建立, 現有电力系統的扩大, 以及大渠道和大型抽水站的修建, 就使得电力事業飞躍地發展起来; 因而在設計工作者的面前也就提出了新的問題: 怎样經濟地来利用火电站、無調节水电站以及抽水站的設備。从这一观点看来, 在某些个别情况下, 修建水力蓄能發電站是有意义的。

在本書中作者試圖系統地整理水力蓄能方面已有的文献和設計資料。这些資料是国外已經建成的水力蓄能發電站和苏联工程師們所作出的几个設計。

本書仅仅在日負荷圖範圍內作水力蓄能的研究。至于季节性水力蓄能的問題, 本書只是着重闡述季节性水力蓄能發電站运行中的基本原則。“季节性”和“晝夜性”水力蓄能發電站的建筑物和設備的施工技术条件, 并沒有很大的区别。这两种水力蓄能發電站在規模上的差別比性質上的差別要大些。比較起来說, “晝夜性”水力蓄能發電站的各种建筑物是較“季节性”水力蓄能發電站趋于标准化, 其水能計算也比較肯定。

至于水力蓄能發電站在电力系統中的运行条件, 本書的闡述只是一般地論証水力蓄能發電站的效益性与經濟性。

最后, 对 A. П. 尤芬在作者进行水力蓄能各項問題研究时所給予的莫大帮助, 还有 И. А. 捷尔曼和 Л. С. 托曼舍維奇对于本書提出了寶貴指教, 謹致以衷心的感謝。

作 者

目 录

前 言

第一章 水力蓄能發電站概論	4
1 水力蓄能的实質	4
2 各种水力蓄能發電站的基本差別	6
3 水力蓄能的效率	8
4 水力蓄能机和其他蓄能机的比較	9
第二章 電力系統中应用水力蓄能的基本前提	11
5 晝夜性水力蓄能的动力前提	11
6 水力蓄能發電站在运行上的优点	16
第三章 日調节水电站和担負峯荷的水力蓄能發電站的运行 情况	19
7 日調节水电站和設有水泵抽水的水电站的蓄能能力比較	19
8 有調节水电站的蓄能能力的特性	20
9 水力蓄能發電站的容量和蓄能能力的決定	25
10 水力蓄能發電站的蓄水池容积的決定	33
第四章 設有水泵抽水的水电站的水能計算	35
11 緩冲蓄水池的容积	35
12 水电站从容积为 $(R+V)$ 立方公尺的緩冲蓄水池中, 用水泵抽 取补充容积 V , 以提高河川水量的利用	37
13 水电站在容积为 R 立方公尺的緩冲蓄水池中进行水泵抽水, 以提高河川水量的利用	39
14 在容积为 R 立方公尺的緩冲蓄水池上进行水泵抽水, 其抽水 時間受到限制时水电站的运行	44
15 水泵从容积为 R 立方公尺的緩冲蓄水池中抽水, 其抽水極限允 許時間的圖解	45
16 水电站按水輪机方式滿載运行的历时的圖解	49
17 水电站从容积为 $(R+V)$ 立方公尺的緩冲蓄水池中, 用水泵抽 取最大可能的容积, 以增加河川水量的利用	52
18 上游水电站在峯荷工作对下游水电站發電量的影响	56

19	上游水电站在早晚峰荷上間断地工作及其工作对下游水电站發電量的影响	63
第五章 水力蓄能發電站的建筑特点		
20	水力蓄能發電站建筑物的基本佈置型式	65
21	水力蓄能發電站建筑物的施工-技术条件	69
第六章 水力蓄能發電站的主要設備		
22	水力蓄能机組的基本型式及其应用范围	77
23	水力蓄能机組的組成及其軸的佈置	79
24	蓄能水泵的型式及其示性曲綫	83
25	水泵的調节	86
26	机組比轉数、水輪机容量与水泵容量的选定	91
27	水泵級数的选择	96
28	水力蓄能机組的水輪机	99
29	反压式水輪机	99
30	可逆式水輪机(水泵-水輪兩用机)	105
31	水力蓄能机組联結器的用途及对它的要求	114
32	电磁联結器	115
33	水力联結器	118

第一章 水力蓄能發電站概論

1. 水力蓄能的實質

如果發電站不能蓄能，其出力应当經常等于外界的电功率需要，电站則必須准确地遵照用电方式进行运行。用电方式若有了很大的变动，电站的出力也就要發生相当大的变化，这就造成了电站运行上的困难。为了使电站的运行方式趋于均衡，就应力求在負荷低落时将能量存蓄起来，以供后来在最大負荷时之用。大型电力系统中最普遍采用的蓄能設備，是水力蓄能發電站。

水力蓄能的實質，在于用水泵把大量的水抽到高处的蓄水池中，也就是把电能变为水的位能，以供后来水輪机运行之用。

在按日負荷圖运行时，水力蓄能發電站把基荷电站在夜間負荷低落时所未利用的能量存蓄起来，而在外界电力需要最大的时候供給这一部分能量。也就是把夜間負荷低落时便宜的电能变成日間尖峯負荷时昂貴的电能。在無調节水电站上进行季节性蓄能时，水力蓄能發電站則可以把夏季沒有利用的棄水的能量变成冬季有价值的电能。

根据日負荷圖运行的水力蓄能發電站，一般都具有下面的一些主要建筑物：下游蓄水池——人工蓄水池或天然水塘，位于下游蓄水池岸旁的發電站厂房，上游蓄水池和連接着蓄水池与發電站厂房的压力水管。在水力蓄能發電站的厂房內安裝着若干机組，这些机組通常由同軸的水輪机、水泵和作为發電机或电动机运行的同步机所組成。

圖1和圖2所示的水力蓄能發電站，安裝有四台蓄能机組，其总容量为140 000瓩。这个电站的下游蓄水池是下一級水电站的壅水段(圖上未示出下游壅水建筑物)。上游蓄水池是一个人工蓄水池(开挖后圍以擋水牆)，它建筑在高出下游蓄水池水面155

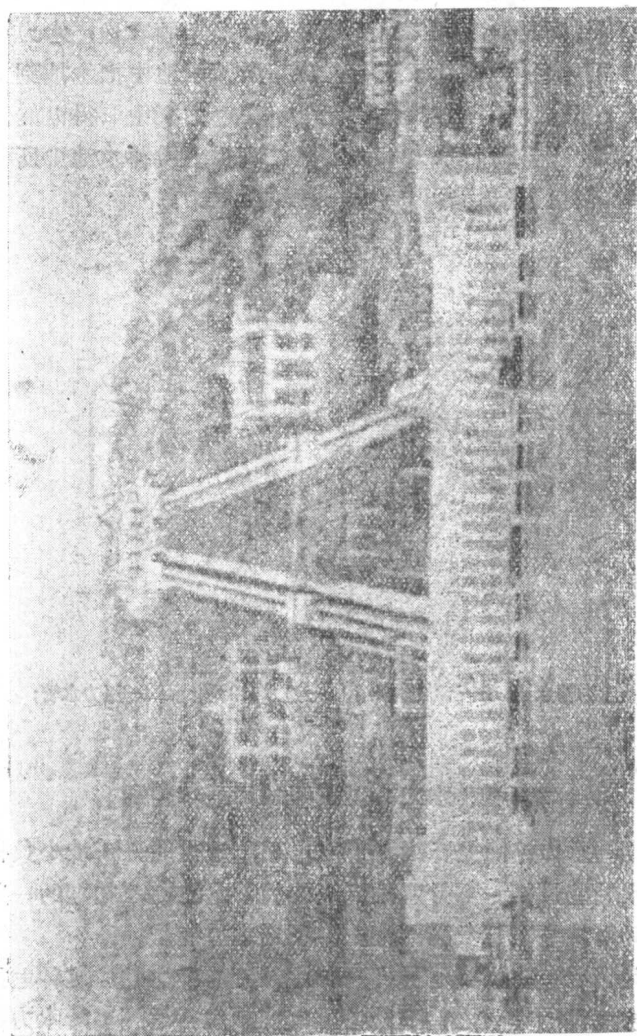


圖 1 水力蓄能發電站的全圖(从下游蓄水池向上看)

公尺的小山崗上。和安裝在厂房內机組数目相同的四条水管，从上游蓄水池通到發電站厂房。

在負荷圖夜間低落时，如果系統中有多余的容量，水力蓄能發電站就可以水泵方式进行运行，从下游蓄水池中把水抽到上游蓄水池里。在这种运行方式中，發電机由电力網中取得电能作为电动机运行。在峯荷时水力蓄能發電站利用上游蓄水池中所蓄存的水量以水輪机方式运行，向电力網供应电力。

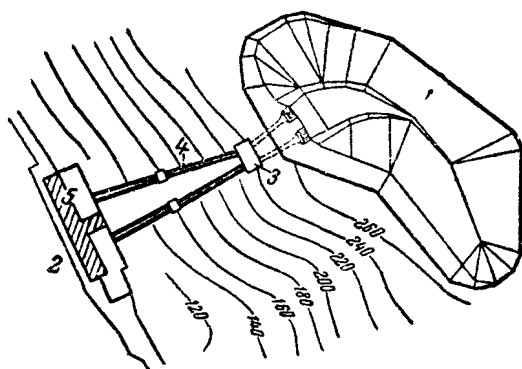


圖 2 水力蓄能發電站建築物平面圖

1—上游蓄水池；2—下游蓄水池；3—進水口的閘門；4—壓力水管；
5—水電站厂房。

2. 各种水力蓄能發電站的基本差別

初期的水力蓄能是在無調节水电站上进行的。在最小負荷时利用棄水的能量把一部分水抽到高处的蓄水池內。初期的一些水力蓄能發電站是在日負荷圖範圍內利用这些能量。

很久以后，才出現了另外一种水力蓄能發電站，这种电站把無調节水电站的季节电能变为冬季电能。进行季調节的水力蓄能發電站，其特点是蓄水容积相当大，其运行方式也特殊。已經建成的晝夜性水力蓄能發電站的蓄能容量最大不超过 600 000 瓩时；而石留赫捷耶季节性水力蓄能發電站的蓄能容量則 达到 43 000 000

厖时。对已经建成的晝夜性水力蓄能发电站来说，上游蓄水池的有效容积不超过 2 000 000 立方公尺，而上述的那一个季节性水力蓄能发电站的水庫有效容积则为 110 000 000 立方公尺。当然，上述的容积数值决不是技术上的極限值。

在某些有調节的水电站上也进行着水力蓄能，其目的是在于最大限度地利用其調节容积和增大其担負峯荷的工作范围。这一类水电站基本上是利用河流的天然流量。只在有限时期內主要是在秋冬兩季最大負荷期間才用水泵蓄能。这一类基本上利用河流天然流量和以一定容积进行水力蓄能的水电站，叫做設有水泵抽水的水电站。

無論是季节性水力蓄能或者是晝夜性水力蓄能都可以在水电站上安設水泵进行抽水来实现。在后面的一种情况下，通常一定会大大地增加水电站担負峯荷的容量，但有时可能需要在水电站下游修建緩冲蓄水池(反調节蓄水池)，借以緩和水电站下游流量的变化。

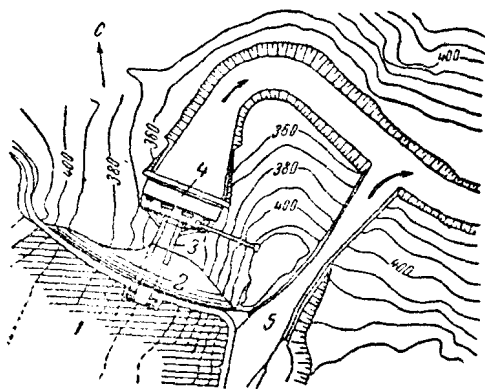


圖 3 設有水泵抽水的水电站建築物平面圖

1—水庫；2—壩；3—壓力水管；4—水电站厂房；5—溢洪道

圖 3 是一个設有水泵抽水的水电站。該电站水庫的有效容积为 1900 万立方公尺，主要是为了通航放水，以期在河中保持一定的通航水深。同时在秋冬期間水庫中約有 300 万立方公尺的一

小部分容积是用来进行昼夜性水力蓄能(安装在該电站上的兩部容量为 20 000 瓩的机組是水泵蓄能机組)。由于这样,該电站所担负的峯荷容量就提高了許多倍。

在某些情况下,甚至在有大型水庫的地方,水泵抽水蓄能也会有着很大的效益。在設有水泵抽水的水电站中,并不是所有机組都是能进行蓄能的,抽水蓄能机組的数目和容量是根据电力系统中的条件来决定的,特别是利用外来的电力(即自电力系统中取得的电力)以进行水泵抽水的这个条件所决定的。設有水泵抽水的水电站只是部分蓄能的电站,因为蓄能对它來說,只有着次要的意义。另外有一种水电站,它不利用天然水量,而只利用从下游蓄水池移到上游蓄水池,再流回下游蓄水池中的一部分水量来蓄存“外来的”能量。像这种水电站是“純粹蓄能”的电站,我們把它叫做水力蓄能发电站,或簡称为蓄能发电站(見圖 1 及圖 2)。

3. 水力蓄能的效率

在水力蓄能的过程中,設備和建筑物以水泵方式和水輪机方式工作着,同时也就产生了运行上的损失。水力蓄能的总效率(不計輸电綫路上的損失)是水泵效率、水輪机效率,以及以水泵方式和水輪机方式运行时的电机、变压器和輸水管等效率的相乘积(見圖 4)。其数值随外界負荷而变动于 0.66 到 0.50 之間,运行的平均值为 0.54。

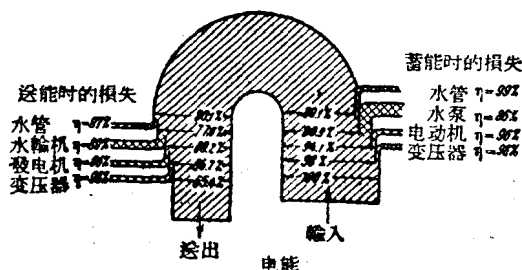


圖 4 水力蓄能的效率

尽管水力蓄能的效率比较低，但是已经建成的水力蓄能发电站都有着相当良好的效果，因为它们保证了所供应的电力系统能可靠的运行。除此以外，也不要忘记，用来存蓄火电站能量的水力蓄能发电站可以提高火电站的经济性。

4. 水力蓄能机和其他蓄能机的比较

除了水力蓄能机以外，还有其他一些也是用来蓄存电能的设备，如蒸汽蓄能机和电力化学蓄能机。

蒸汽蓄能机 应用最广的要算是变压蒸汽蓄能机，即一般通称为卢特斯蓄能机。这种蓄能机通常做成容积达310立方公尺，其中可装水达90—95%的金属貯水箱。

在西欧各个火力发电站上所安装的变压蓄能机，其放电最长的持续时间不超过2.4小时，其正常放电持续时间一般小于或等于1—1.5小时，即蓄能机只能担负极短时刻的尖峰负荷。

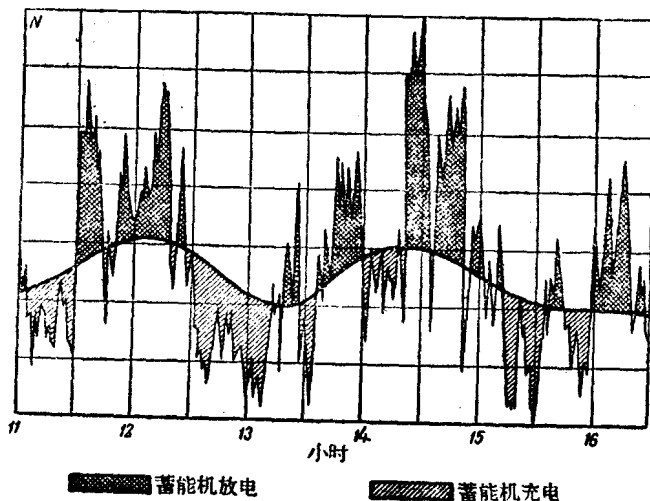


圖 5 外国一个供电給电动列車的、其中安裝有变压蒸汽蓄能机的发电站的負荷圖

圖 5 是外国一个供电給电动列車的、其中裝有盧特斯蓄能机

的發電站的負荷圖。其尖峯跳動非常頻繁，使所需出力發生这样显著而劇烈的變動，以致于沒有蓄能机就不可能保證外界的电的需要。因此，在这个電站上裝置了雙壓式汽輪机，它在基荷時用新生的高壓蒸汽工作，在峯荷時則用存蓄下來的低壓蒸汽工作。在許多情況下安裝蒸汽蓄能机可以節省大量燃料。燃料節省的多少要看電站的設備及電站的運行方式而定。由國外資料可知，安裝了盧特斯蓄能机的火電站每年可保證節省燃料約40%*。

電力化學蓄能机 在現代的中心發電站上，通常都設有電力化學蓄能机(蓄電池組)作為操作儀表和事故照明的直流電源。而將電力化學蓄能机作為電源來均衡火電站或無調節水電站的運行方式的情況，只有在西歐某些城市中還保存着。這些城市的個別地區是用直流電供應電力的。蓄電池組放電的持續時間約為一小時，只可用來擔負晚間峯荷的最高部分。同時，其容量約可保證日發量的0.2%。

鉛蓄電池的效率為60—70%。

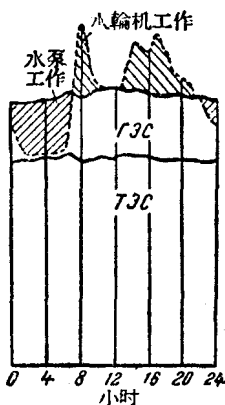


圖6 外國某電力系統負荷圖

將水力蓄能机同蒸汽蓄能机、電力化學蓄能机相比較就可以看出：在容量上和蓄能容量上，水力蓄能机大大地超過其他一切蓄能机。因此，對大型電力系統來說，實際上它是唯一適用的蓄能机。

圖6所示為某一電力系統的負荷圖，圖上部由赫爾德凱水力蓄能發電站負擔，它填滿了圖上的低落部分，同時也擔負起峯荷部分。赫爾德凱水力蓄能發電站的容量為140 000瓩，其蓄能能力為560 000瓩時。

從圖6中可以看出，在此情況下，利用了工作于腰荷的無調節水電站所溢棄的（未利用的）電能來進行水力蓄能。擔負負荷圖整個基荷部分之火電

* L. 莫塞爾著“電力供應中現代蓄能的技術條件及其遠景”（德文版）（ETZ1935 № 29）。

站全晝夜都以固定容量工作着。还必须着重指出，圖 6 所示的电力系統的負荷圖是非常紧凑的。尽管如此，这样一个大容量的水力蓄能發電站参加到該系統中来，还是合适和經濟的。

值得提出的是：在上述同一电力系統中，除了赫尔德凱水力蓄能發電站（它在夜間負荷低落时把無調节电站多余电能存蓄起来）以外，还有一个容量为 130 000 瓩的石留赫捷耶水力蓄能發電站，它把無調节水电站的季节电能存蓄起来，变成为冬季的电能。

应该指出：只有在一定的自然条件下，才能在两个具有必要容积的蓄水池間構成很大的集中水头，才可以安裝水力蓄能机。至于蒸汽蓄能机和电力化学蓄能机却与当地自然条件無關，可以修建在任何地方。

根据外国資料，每一瓩裝机容量造价最低廉的要算变压蓄能机。电力化学蓄能机的造价大概超过蒸汽蓄能机的一倍。水力蓄能机的造价和自然条件有关，变化范围相当大。但是，即使在最好的条件下，水力蓄能机的造价也超过了蒸汽蓄能机的造价。

蒸汽蓄能机的效率最好，而水力蓄能机的效率最差。

第二章 电力系統中应用水力蓄能的基本前提

5. 晝夜性水力蓄能的动力前提

在大多数情况下，大型供电系統总是把各种不同的發電站——供热式电站、凝汽式电站和水电站联合起来，同时与它們的运行特征相配合，經濟地分担总的負荷。由于將各种不同的电站联合起来，并协同并列运行，这就造成了許多相互間的利益。这些利益就是無論火电站或水电站的一切有利特点都能获得充分的利用，同时还消除了各电站单独供电时所存在的缺点。

某些电力系統有着这样的条件：即在該系統中不增加各个电站的裝机容量，而只設置一些水力蓄能發電站来担負附加負荷。下

面我們研究关于修建專門水力蓄能發電站的合理性的先决条件。

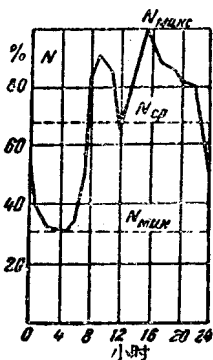


圖 7 電力系統的日負荷圖

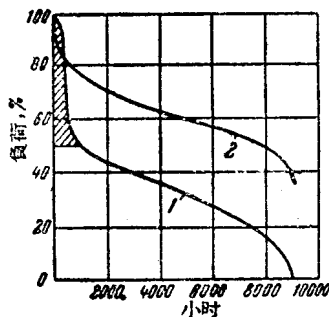


圖 8 不同電力系統的容量利用的历时曲綫
1—外国電力系統；2—苏联電力系統。

圖 7 是外国某電力系統的冬季日負荷圖，圖 8 是代表不同電力系統裝機容量利用的历时曲綫。从圖 7 中可以看到，夜間最小負荷 $N_{\min}$ 总共只有最大負荷 $N_{\max}$ 的 30%，外国電力系統在負荷 50% 到 100% 範圍內的上部容量(尖峯的)每年利用得很少(其發電量总共只有系統總發電量的 4% 到 6%)。由于外国電力系統負荷圖有这样的尖峯，就不得不增加电站容量，虽然这容量在一年中很少利用。

在社会主义計劃經濟的条件下，完全有可能在一定限度內来調整外界的電力需要，以減低負荷圖的尖峯并把負荷低落部分填充起来。因此，苏联電力系統的負荷圖比資本主义国家電力系統的負荷圖有利得多。因为它有很大的充滿程度和很小的尖峯。

比較一下圖 8 的曲綫 1 和 2 不难看出，苏联電力系統負荷曲綫高度的充滿程度，要比西欧電力系統大到怎样的程度。

苏联電力系統中，在系統負荷 50—100% 範圍內工作着的上部(峯部)容量，其利用时数非常大，其年發電量达系統總發電量的 20%。而在西欧電力系統中却只有 4—6%，成了一个鮮明的对比。

然而，即使在苏联電力系統中最緊湊的負荷圖上，也还可以

看出，在全年中，特別是在一晝夜間，外界電力需要仍然有着相當大的變化。這就是我國某些電力系統適于採用水力蓄能發電站的條件。

在同一電力系統中，如果各種電站共同擔負全部負荷而聯合運行，就有必要使每種電站在擔負負荷方面專門化，也就是說，當各個電站聯合并列運行時，應盡力使它們的運行方式達到最好的配合。由於把負荷圖劃分為基荷部分和峯荷部分，因而也可以把電站劃分為基荷電站和峯荷電站。

電力系統中如有日調節水電站，通常總是由它來擔負峯荷。日調節水電站是最有潛力的峯荷電站，比其他電站更適合於擔負峯荷。因為日調節水電站在峯荷工作和它用固定容量工作比較起來，幾乎沒有什麼水量的額外損失（對高水頭電站來說），而對於低水頭電站來說，生產1瓩時發電量所需增加的單位耗水量也不很大，且大大地少於火電站（凝汽式）在峯荷工作時所額外增加的單位煤耗。

因此，由凝汽式火電站、供熱式火電站、日調節水電站和無調節水電站所組成的電力系統，其負荷圖基荷部分應由供熱式火電站和無調節水電站來擔負。凝汽式火電站則位於負荷圖的底部和中部（腰荷）；所剩下的峯荷部分歸日調節水電站來擔當。

必須強調指出：當有可能使日調節水電站擔負峯荷時，則在任何情況下都最好是由它來擔負，而不讓其他所有的電站來擔負，其中甚至包括水力蓄能發電站。

電力系統中如沒有日調節水電站，則凝汽式火電站就不得不擔負負荷圖的峯荷部分。在這種電力系統中，所有負荷圖的腰荷與峯荷部分都得由不適於在該部分工作的凝汽式火電站來擔當。

火電站擔負峯荷和腰荷工作時，就必然產生下列現象：或是在負荷低時各個機組的出力顯著降低，或是個別機組在一定時間內（4—5小時）停止運行。但是大型汽輪機出力的降低程度要受到本身技術最小出力的限制，通常約為其最大出力的20—25%。因為汽輪機空轉的損失不因機組負荷而有所改變，所以汽輪機出力

减小，就使得它的效率急剧地降低，单位煤耗量大大地增加。应当指出，如果火电站使用只含少量挥发性物质的煤（例如无烟煤粉或者只含有10—12%挥发性物质的劣质煤），则不允许机组出力有很大的降低。例如使用无烟煤粉的锅炉，不允许锅炉蒸汽生产量下降到最大蒸汽生产量的60—70%，否则锅炉中的温度就会下降，这时实际上也就等于停炉了。因此对于使用只含少量挥发性物质的煤的火电站，其机组技术最小出力为最大出力的60—70%。

另一方面，个别机组短时间的停车，虽然可以增加正在运行着的机组的负荷，以提高其效率，可是这些个别机组在后来开动时却有着相当大的损失。

因此，火电站机组出力的降低，实际上是限制在相当狭窄的范围内，而且在所有情况下，都会发生很大的损失，即显著地增加了单位煤耗。

将容量为50 000瓩的高压汽轮机在蒸汽压力为80大气压、蒸汽温度为490°C的情况下开动起来，从冷状态到正常转速需要二小时零十分。如果汽轮机处于热状态下，也要一小时才可以达到正常转速。汽轮机负荷的增减，在任何范围内都是以每分钟1500—2000瓩的速度进行的。

启动蒸汽压力为70大气压、温度为490°C、容量为24 000瓩的凝汽式汽轮机，大约也需要同样多的时间。要启动汽轮机必须预先将长度为40公尺的蒸汽管道加热30—40分钟。达到600公厘水银柱真空需要17分钟，将汽轮机启动到转速为300—400转/分钟又要加热50—60分钟。最后汽轮机增加到正常转速（3000转/分）还需要30分钟。汽轮机负荷的增加速度为每分钟1000—1200瓩。

从这些例子中就可以看到，大型凝汽式汽轮机停车以后，会使其启动时发生很大的损失，这还没有计算汽轮机停车时锅炉空载所造成锅炉中的损失。这样，凝汽式汽轮机短时停车将会引起锅炉空载的损失，清洗蒸汽过热器和蒸汽管时的损失，汽轮机保暖和空转时的损失，以及供水泵加热的损失等等。如果凝汽式汽