

# 结合系统调峰容量比确定 抽水蓄能机组装机容量的方法

曹 昉,张粒子

(华北电力大学 电气工程学院,北京 102206)

**摘要:** 根据机组可调容量占装机容量的比重,建立了机组调峰容量比的概念,将其作为衡量机组调峰能力的依据;并将此概念进一步扩展,得到电网综合调峰容量比的概念;然后以满足电网的综合调峰容量比为目标,计算电网所缺少的调峰容量的大小,从而确定抽水蓄能机组的装设容量范围,再依据抽水蓄能电站实际运行小时进行装设容量的优选,使装设的抽水蓄能机组容量既适应电网调峰的要求,又能有较好的运行方式。结合实例进行了计算和分析,验证了该方法能够根据调峰机组运行方式来进行调峰机组的电源规划,具有一定适用性。

**关键词:** 电源规划; 调峰容量比; 抽水蓄能机组; 装机容量

**中图分类号:** TM 715

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)06-0047-04

## 0 引言

在我国以煤电为主的发电能源结构中,大多数常规火电机组能够灵活调节出力的能力不足额定容量的 50%,若负荷变化的需求超出机组这一出力范围,则需要部分小容量机组启停调峰或压火调峰,更为甚者,为了满足足够的调峰容量,系统需装设和运行更多的机组并改进火电机组运行方式来满足调峰的需求<sup>[1-2]</sup>,这就大幅度增加了系统的运行成本。

当传统的火电机组由于运行方式不够灵活而难以解决调峰需求的矛盾时,抽水蓄能机组由于其运

行方式灵活、不受季节约束,具有启停迅速、出力变化速度快的特点<sup>[3-4]</sup>,在系统运行中可以承担调峰、调频、调相、备用和黑启动等任务,同时具有填谷的作用,对提高电能质量和保证电网安全、经济运行发挥着重要作用。抽水蓄能电站(pumped-storage plant,下称 P-S 电站)的年发电小时数一般为 800~1 600 h,发电成本是常规火电成本的 1.25 倍左右。

确定 P-S 电站在电力系统中的合理比例涉及的因素很多,如电网所在地区能源蕴藏和开发情况、电网的电源结构及电站分布、负荷特性、电网所能提供的抽水电能、P-S 电站自身开发条件、各类电站的投资和运行费用等。文献<sup>[5-6]</sup>分别介绍了以系统总费用最小为目标的 P-S 电站装机规模确定和

收稿日期:2006-06-28;修回日期:2006-11-21

考虑电源结构及负荷特性的抽水蓄能装机容量确定,文献[7]从抽水蓄能的动态和静态效益上论证了 P-S 电站的容量确定。文献[8]从电网电源现状及构成特点对抽水蓄能建设规模进行了分析。文献[9]运用多目标对 P-S 电站的运行方式进行了规划。

随着我国经济的发展,第三产业用电量迅猛上升,造成电网的峰谷差进一步加剧,使得调峰矛盾更为剧烈,电源规划必须跟随负荷的急剧变化而变化<sup>[10]</sup>,从而电网对辅助服务的需求也更为紧迫<sup>[11]</sup>,因此,从解决调峰矛盾的需求上确定抽水蓄能的容量是很有必要的。

## 1 P-S 电站容量的取值范围

火电机组运行时,其正常发电出力范围受到最小技术出力和最大技术出力的约束<sup>[12]</sup>,其最小出力一般达到额定出力的 70%,少数机组可达到 60% 或 50%,也就是说,一台 200 MW 的机组,在正常运行时最小的发电容量也应当为 140 MW,其可以灵活变动的出力范围为 140~200 MW,将这一可灵活变化的容量数值与机组额定容量之比称为调峰容量比,如式(1)所示。

$$R_G = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_N} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $R_G$  为发电机组的调峰容量比; $P_N$  为发电机组的额定发电出力; $P_{\max}$  为发电机组的最大技术出力,多数火电机组的最大技术出力与额定出力相等; $P_{\min}$  为发电机组的最小技术出力。

由式(1)类推,定义系统综合调峰容量比,即系统中所有运行机组的可调节容量占这些机组额定总容量比值。在我国以火电为主的系统中,系统综合调峰容量比大都小于 50%,若系统中有部分核电机组或(供热期的)热电机组等基荷机组,由于这些机组的调峰容量比几乎为 0,则综合调峰容量比更小。因此,只有电网负荷峰谷差占最大负荷的比例小于或等于系统的综合调峰容量比时,系统的调峰矛盾才能够得以解决。由于通常以火电为主的系统的实际负荷不能满足这一要求<sup>[12-13]</sup>,而 P-S 机组的调峰容量比为 200%,因此 P-S 电站机组的装设容量应以能够满足系统所需综合调峰容量比为基本原则,则系统中 P-S 电站的装设容量应为

$$R_D = \frac{(P_{D,\max} - P_{P-S}) - (P_{D,\min} + P_{P-S})}{P_{D,\max} - P_{P-S}}$$

进而有

$$P_{P-S} = \frac{(1 - R_D)P_{D,\max} - P_{D,\min}}{2 - R_D} \quad (2)$$

式中  $P_{P-S}$  为 P-S 电站装设容量; $R_D$  为系统需求的综合调峰容量比(不含 P-S 电站); $P_{D,\max}$  为系统最大负荷需求; $P_{D,\min}$  为系统最小负荷需求。

上面公式看似解决了 P-S 电站容量确定的问题,但实际上,还要从经济上作进一步的比较分析,即 P-S 机组在运行时还需满足另一项约束条件,即

抽水电量与发电电量比,也就是电站发电效率的问题,如图 1 中所示,阴影面积分别表示 P-S 机组的发电量和抽水用电量,而它们之比应为电站发电效率, P-S 机组的发电效率大致为 70%~80%<sup>[9]</sup>,并且由于发电、抽水运行时间的不同,发电容量( $P_1 - P_2$ )并不一定与抽水容量( $P_3 - P_4$ )相等,所以式(2)应改写为

$$R_D = \frac{(P_{D,\max} - P_{P-S,1}) - (P_{D,\min} + P_{P-S,2})}{P_{D,\max} - P_{P-S}} \quad (3)$$

$$\eta_{P-S} = E_g / E_u$$

式中  $P_{P-S,1}$  为 P-S 电站发电容量; $P_{P-S,2}$  为 P-S 电站抽水容量; $\eta_{P-S}$  为 P-S 电站的发电效率; $E_g$  为 P-S 电站发电量; $E_u$  为 P-S 电站抽水用电量。

由式(3)可见,P-S 电站装设容量应不小于发电容量与抽水容量的最大值,即

$$P_{P-S} \geq \max[P_{P-S,1}, P_{P-S,2}] \quad (4)$$

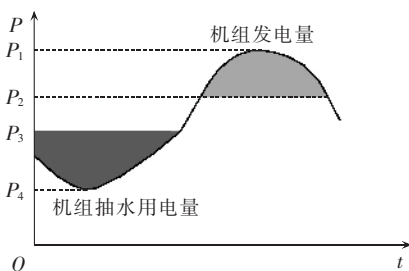


图 1 抽水蓄能机组发电示意图

Fig.1 Operation curve of P-S unit

P-S 机组发电后,会改善系统常规火电机组的出力曲线,使常规火电机组低谷出力上升,高峰出力下降,最极端的情况是使常规机组出力保持恒定,由于各电网每日的负荷并不相同,取目标年中的最大峰谷差日负荷曲线和最小峰谷差日负荷曲线作为 P-S 电站的容量取值标准,将使最大峰谷差日常规火电机组恒定出力所需要的 P-S 机组容量作为 P-S 电站最大装设容量,以在最小峰谷差日满足常规火电机组基本调节容量作为 P-S 电站的最小装设容量,而以典型日负荷曲线所需要的调峰容量进行发电量验证,进一步确定最佳的 P-S 电站容量。则 P-S 电站的装设容量范围可由式(5)表示。

$$P_{P-S,\min} \leq P_{P-S} \leq P_{P-S,\max} \quad (5)$$

式中  $P_{P-S,\min}$ 、 $P_{P-S,\max}$  分别为 P-S 机组在最小、最大峰谷差负荷日运行需装设的容量。

## 2 对 P-S 电站发电量的验证

应用典型负荷曲线进行发电量验证,主要目的是求出 P-S 电站在典型负荷下的年发电小时,由于负荷在低谷、高峰时持续时间不同,并且负荷变化速度也有所不同,加之 P-S 机组的发电效率和设计库容的影响,因此即使相同容量的 P-S 电站在同一负荷曲线下,当发电效率不同或设计发电小时不同时,其实际发出的电量也会有所不同。文献[14-15]分别介绍了考虑负荷及发电出力情况下的 P-S 机组优化运行模式的确定方法。由于 P-S 机组是很好的调峰电源,为了满足系统负荷的要求,在应用典型负

荷曲线计算出 P-S 机组年发电小时后,也按照预留的负荷变动比例对 P-S 机组的运行小时作出相应的“裕度”调整,观察这一“裕度”范围内 P-S 机组容量对改善系统综合调峰容量比的贡献,以使系统综合调峰容量比适应负荷的需求且运行时间较长的 P-S 电站容量为最佳装机容量。

3 实例

取某电网目标年最大峰谷差日负荷曲线、最小峰谷差日负荷曲线及典型日负荷曲线,为计算方便,现剔除掉该电网目标年所运行的热电厂、径流式电厂等不可调节出力的电厂的出力,得到常规火电厂最大峰谷差、最小峰谷差和典型负荷日的发电出力曲线图,表 1 所示为最大、最小峰谷差和典型负荷曲线下的最大、最小负荷;图 2 所示为该电网最大峰谷差日负荷曲线(实线部分)和典型日负荷曲线(虚线部分)。

表 1 各种负荷曲线下的负荷值  
Tab.1 Loads of different load curves MW

| 负荷   | 最大峰谷差<br>日负荷 | 最小峰谷差<br>日负荷 | 典型<br>日负荷 |
|------|--------------|--------------|-----------|
| 最大负荷 | 15977        | 15079        | 15370     |
| 最小负荷 | 9401         | 10233        | 10111     |

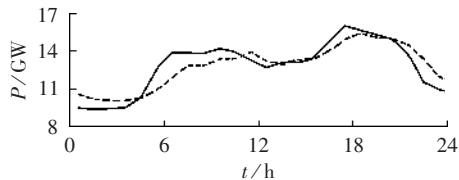


图 2 系统日负荷曲线  
Fig.2 Daily load curves of system

该电网多数大型常规火电厂的调峰容量比为 30%,计算得系统此时的综合调峰容量比为 29%。

根据式(3)(4)分别取最大峰谷差负荷时调峰容量比为 0、最小峰谷差负荷时调峰容量比为 29%,计算出该电网 P-S 机组的调峰容量取值,得到 P-S 机组容量范围[102 MW 3 957 MW]。

根据实际机组容量的取值特点,取 P-S 机组的装设容量范围为[100 MW 4 000 MW]。

根据典型负荷曲线验证发电量计算时,年运行小时数假定为典型日发电小时数与年天数的乘积,取 P-S 机组年发电设计小时为 1 500 h,表 2 为在典型负荷曲线下 P-S 机组的年运行小时及对系统常规火电机组调峰容量比的影响,其中调峰容量比的计算如式(3)所示。

取负荷变化±5%,即最大负荷上升 2.5%、最小负荷下降 2.5%且负荷曲线线型不变来调整,得出 P-S 机组运行小时及 2 种负荷下系统调峰容量比的变化,机组运行小时在装机容量 3 200 MW 以内不会发生变化,继续保持 1 500 h,变化部分仅在 3 200 MW 装机容量以上部分。

由于该电网系统调峰容量比为 29%,因此观察调峰容量比在 29% 以内部分的变动情况,在典型负荷下 P-S 电站装机容量需要超过 550 MW,在最大

表 2 典型负荷曲线下 P-S 机组对系统的影响  
Tab.2 Influence of P-S unit on grid peak-regulation proportion for typical load curve

| 电站装设<br>容量/MW | 年发电<br>小时/h | 系统典型<br>负荷调峰<br>容量比/% | 系统最大<br>峰谷差调峰<br>容量比/% |
|---------------|-------------|-----------------------|------------------------|
| 300           | 1 500       | 30.9                  | 38.12                  |
| 400           | 1 500       | 29.8                  | 37.1                   |
| 500           | 1 500       | 28.7                  | 36.0                   |
| 1 000         | 1 500       | 22.7                  | 30.6                   |
| 1 500         | 1 500       | 16.3                  | 24.7                   |
| 2 000         | 1 500       | 10.5                  | 18.43                  |
| 2 500         | 1 500       | 6.1                   | 12.7                   |
| 3 000         | 1 500       | 2.3                   | 7.8                    |
| 3 500         | 1 431       | 0                     | 3.5                    |
| 4 000         | 1 252       | 0                     | 0                      |

峰谷差负荷下 P-S 电站容量需要超过 1 200 MW,因此,按照在典型负荷日使系统火电机组综合调峰容量比大于 29%、最大峰谷差日使系统火电机组综合调峰容量比接近 29% 的原则规划 P-S 电站的装机容量,最终选取 1 200 MW 作为最终装机容量。图 3、4 为 P-S 电站装机容量 1 200 MW 时的最大峰谷差日火电机组发电曲线和典型负荷日火电机组发电曲线图(图中,实线为无 P-S 机组情况,虚线为有 P-S 机组情况)。

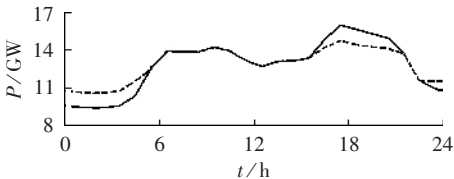


图 3 系统最大峰谷差日火电机组发电曲线  
Fig.3 Daily operation curves of thermal power units for biggest peak-to-valley difference

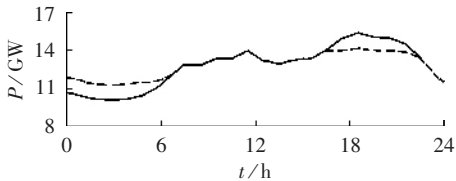


图 4 系统典型负荷日火电机组发电曲线  
Fig.4 Daily operation curves of thermal power units for typical load

4 结论

首先,提出了调峰容量比的概念,将之应用于单台机组调峰能力的计算,并在此基础上发展为系统综合调峰容量比的概念,进而可用它来计算由不同电源类型所组成的电网所需要的调峰容量。

将调峰容量比用于抽水蓄能机组装机容量的确定上,并用机组的发电量对装机容量进行验证,较好地将电源规划与机组运行方式结合起来。文章表明,电源规划中 P-S 电站装机容量可以结合电网调峰需求进行,既解决了电网的调峰矛盾,又使得 P-S 电站有较好的运行方式。

## 参考文献:

- [1] 张恒良, 谢诞梅, 刘静宇, 等. 调峰机组启停优化控制[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 300-303.  
ZHANG Heng - liang, XIE Dan - mei, LIU Jing - yu, et al. Optimized control of the startup and shutdown of peaking units [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(5): 300-303.
- [2] 余欣梅, 熊信良, 吴耀武, 等. 电力系统调峰电源规划优化模型探讨及其应用[J]. 中国电力, 2003, 36(1): 48-51.  
YU Xin - mei, XIONG Xin - gen, WU Yao - wu, et al. Discussion on optimal mode for peaking units expansion planning and its application [J]. Electric Power, 2003, 36(1): 48-51.
- [3] 方军, 牛东晓, 黄元生. 抽水蓄能电站动态效益的期权评价模型[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 38-41.  
FANG Jun, NIU Dong - xiao, HUANG Yuan - sheng. An options model for evaluating the dynamic benefit of PS stations [J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 38-41.
- [4] 任震, 潘锡芒, 黄雯莹, 等. 市场环境下抽水蓄能电站问题的几点思考[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(1): 6-10.  
REN Zhen, PAN Xi - mang, HUANG Wen - ying, et al. Reflections on the issues of pumped storage power station in deregulated power market [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(1): 6-10.
- [5] 白宏坤, 李干生. 抽水蓄能电站容量在电力系统中的合理比例[J]. 电力建设, 2001, 22(6): 54-56.  
BAI Hong - kun, LI Gan - sheng. Reasonable proportion of the capacity of pumping storage station in the power system [J]. Electric Power Construction, 2001, 22(6): 54-56.
- [6] 舒静, 张健, 郑源. 2010 年抽水蓄能电站在华东电网合理规模探讨[J]. 水电能源科学, 2005, 23(5): 54-58.  
SHU Jing, ZHANG Jian, ZHENG Yuan. Reasonable developmental scale of pumped - storage power station in East China power network in 2010 [J]. Water Resource and Power, 2005, 23(5): 54-58.
- [7] 赵士和. 抽水蓄能电站动能设计中几个问题的探讨[J]. 水力发电, 1999(4): 29-32.  
ZHAO Shi - he. The probe into several question on design of kinetic energy of pumped-storage station [J]. Water Power, 1999(4): 29-32.
- [8] 陈志平, 万炳才. 华东电网抽水蓄能电站发展前景及建设管理模式探析[J]. 华东电力, 2006, 34(2): 18-20.  
CHEN Zhi - ping, WAN Bing - cai. Development prospects and management modes of construction for pumped - storage power stations in East China power grid [J]. East China Electric Power, 2006, 34(2): 18-20.
- [9] 肖颖, 印永华, 郭建波. 利用多目标模糊动态规划法进行抽水蓄能电站的运行优化[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 15-19.  
XIAO Ying, YIN Yong - hua, GUO Jian - bo. Short term scheduling of pumped - storage plant using multi - objective fuzzy dynamic programming [J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 15-19.
- [10] 杨澎, 陈少华. 电力系统负荷调整对电源规划的影响[J]. 广东电力, 1997(3): 48-51.  
YANG Peng, CHEN Shao - hua. The influence of load adjusting on power source planning in power system [J]. Guangdong Electric Power, 1997(3): 48-51.
- [11] 曾鸣, 刘万福, 张毅, 等. 满足电网安全运营约束的辅助服务交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 82-87.  
ZENG Ming, LIU Wan - fu, ZHANG Yi, et al. Study on ancillary service trade model with grid operation constrained [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 82-87.
- [12] 廖胜利, 程春田, 蔡华祥, 等. 改进的火电调峰方式[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 89-93.  
LIAO Sheng - li, CHENG Chun - tian, CAI Hua - xiang, et al. Improved algorithm of adjusting discharge peak by thermal power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 89-93.
- [13] 曾庆禹. 市场条件下的发输电规划协调与运行模式[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1-5.  
ZENG Qing - yu. Generation / transmission expansion planning model and operation model in power market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 1-5.
- [14] 曾兆祺. 天荒坪抽水蓄能电站的调度运行原则[J]. 华东电力, 2001, 23(3): 1-4, 62.  
ZENG Zhao - qi. Principle of dispatching and operation for Tianhuangping pumped storage power station [J]. East China Electric Power, 2001, 23(3): 1-4, 62.
- [15] 丘文千. 抽水蓄能电站运行优化的动态规划模型[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(5): 6-10.  
QIU Wen - qian. Dynamic programming models for operation optimization of pumped storage power stations [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(5): 6-10.

(责任编辑: 康鲁豫)

## 作者简介:

曹 昉(1971-), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力市场和电力系统规划(E-mail: caofang111@sohu.com);

张粒子(1963-), 女, 辽宁鞍山人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力市场、电力系统分析与控制方面的研究工作。

## Determination of pumped-storage plant capacity with peak-regulation proportion

CAO Fang, ZHANG Li - zi

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The concept of unit peak-regulation proportion is set as the index of its peak-regulation capability, which is the adjustable part to whole unit capacity. The grid integrated peak - regulation proportion is then set by applying this concept to whole power grid. According to the objective of grid integrated peak - regulation proportion, the shortage of peak - regulation capacity is calculated to set the range of PSP(Pumped-Storage Plant) capacity needed, with which the PSP capacity is determined according to the probable running time of PSPs. It meets the requirements of grid peak regulation and guarantees the better operation of PSPs in a year. The computation and analysis of an example verify the proposed method is practicable.

**Key words:** power source planning; peak - regulation proportion; pumped - storage unit; installed capacity