

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230426

# 计及火电经济出力和最小技术出力的 抽水蓄能合理规模预测

安莉娜, 范国福, 郑丹丹, 杨 莖

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 针对新型电力系统下论证抽水蓄能规模时, 采用的多能互补平衡模型仅计及火电最小技术出力进行燃煤机组调峰所带来的深度调峰高昂的成本, 忽略了燃煤机组与抽水蓄能机组协调运行的经济性问题, 提出将火电经济出力系数与火电最小出力系数作为火电与抽水蓄能协调运行的判别指标, 并将其纳入原多能互补平衡分析模型, 从经济性角度, 以总年费用最小为目标, 预测抽水蓄能规模。以某电网为实例, 阐述抽水蓄能规模的论证过程, 可为类似电网电源发展规划和工程前期设计工作提供借鉴。

**关键词:** 新能源消纳; 火电机组经济调峰; 多能互补平衡; 抽水蓄能

**中图分类号:** TV743; TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)09-0060-04

## 1 引言

传统电力电量平衡分析中, 通常将火电作为兜底电源<sup>[1,2]</sup>, 在新型电力系统下, 系统对调节电源的调节特性提出了更高的要求, 对火电机组深度调峰、储能(包括抽水蓄能和新型储能)规模、电网经济性等需求日益增长。随着“双碳”目标的提出, 对抽水蓄能电站的效益和作用的期待值越来越高<sup>[3]</sup>, 在抽水蓄能合理规模分析中, 只考虑火电最小技术出力, 忽略了火电经济运行。本文以火电和抽水蓄能协调运行出发点, 考虑火电最小经济出力系数和最小技术出力系数, 完成了多能互补平衡分析模型和经济分析模型, 协调了火电和抽水蓄能的运行特性, 实现了系统年费用最小的电源配置及运行优化, 可供电源规划设计参考借鉴。

## 2 多能互补平衡及经济分析模型

### 2.1 多能互补平衡模型和经济分析模型

从计及火电经济出力和火电最小系数出力作为判别参数, 实现火电与抽水蓄能调峰协调运行的思路进行阐述。经济分析模型采用年费用法分析系统总年费用, 总年费用最小的方案即为推荐

方案。系统总年费包含各类电源年费、火电机组燃煤费。

### 2.1.1 火电机组调峰过程

单个火电机组调峰过程一般划分为常规调峰、不投油深度调峰和投油深度调峰三个部分, 见图1。图1中,  $P_r$  为机组额定功率;  $P_{max}$  为常规调峰最大技术出力;  $P_{min}$  为常规调峰最小技术出力(以往为无偿调峰);  $P_a$  为机组不投油深度调峰最低稳燃出力(以往基础上的有偿调峰);  $P_b$  为机组投油深度调峰稳燃极限出力(也是火电最小技术出力, 该阶段因负荷太低, 须通过投油来助燃维持机组安全运行, 为有偿调峰)。图1表明, 调峰

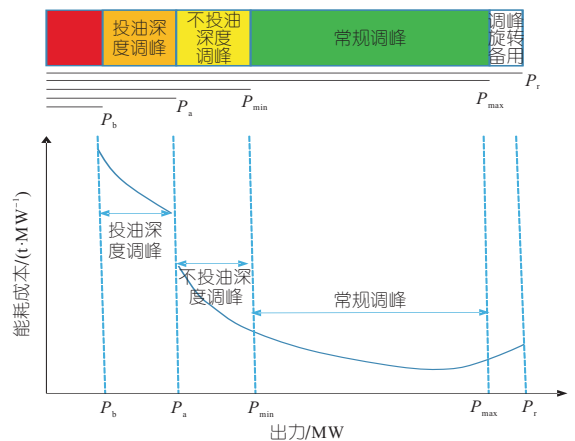


图1 火电机组调峰过程与能耗成本曲线关系示意图  
Fig. 1 Diagram of relationship between peak shaving process and energy consumption cost curve of thermal power unit

收稿日期: 2023-03-21, 修回日期: 2023-04-25

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2020-24)

作者简介: 安莉娜(1975-), 女, 硕士、正高级工程师, 研究方向为水能水资源规划设计等, E-mail: 702286362@qq.com

阶段不同,调峰成本不一。常规调峰时,成本(燃煤和碳排放)随负荷的降低而降低,当达到最优效率点时,为最低值,此后略有抬升;不投油调峰时,成本(燃煤、碳排放、机械磨损)随着负荷的降低而增加;进入投油调峰后,机组炉膛出口烟温逐步降低,脱销反应器入口烟温难以保证,成本(燃煤、碳排放、机械磨损、投油等)陡增。

### 2.1.2 火电经济出力系数

电力系统中各火电机组的调峰性能不一,在系统中可概化视为一个整体,则电力系统整体火电调峰过程及其对应的能耗成本曲线较单个火电机组的能耗成本曲线平缓,投油调峰和不投油调峰的过渡段坡度变缓。共同承担调峰任务的火电和抽水蓄能应以系统耗能最少为目标。因此,需定义火电最小经济出力,当火电出力 > 最小经济出力时,尽量火电调峰;当火电出力介于最小技术出力与最小经济出力之间时,火电和抽水蓄能共同调峰(图 2)。图 2 中,  $P_e$  为火电最小经济出力。可见,火电最小经济出力系数与系统能耗有关。

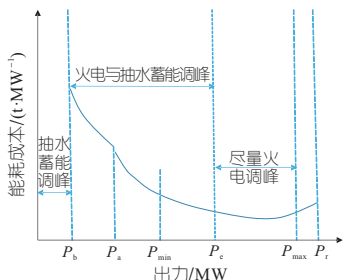


图 2 电力系统中火电与抽水蓄能调峰运行关系示意图

Fig. 2 Diagram of relationship between thermal power and pumped storage peak-shaving operation in power system

### 2.1.3 火电与抽水蓄能调峰运行原理

本文火电与抽水蓄能调峰协调运行是指在残余负荷上进行调峰出力分配,其中残余负荷是指在电网负荷基础上扣除风光电,并扣除水电等可调节电源综合高效运行后的负荷。为便于计算,将抽水蓄能装机规模及其相关参数作为已知条件,在某火电经济出力系数下,以火电费用最小为目标,得到火电规模及其与抽水蓄能协调运行过程。显然,当抽水蓄能装机规模为方案变量时,还需将抽水蓄能费用与对应火电费用一并分析。

(1) 目标函数。函数式为:

$$A = \min \left[ \min \left( \sum_{j=1}^{8760} C_{火rm,j} + C_{火tz} + C_{火yx} \right) + C_{抽tz} + C_{抽yx} \right] \quad (1)$$

式中,  $A$  为目标;  $j$  为小时;  $C_{火rm,j}$ 、 $C_{火tz}$ 、 $C_{火yx}$  分别为火电一年逐时燃料费、投资年金、固定运行

费;  $C_{抽tz}$ 、 $C_{抽yx}$  分别为抽水蓄能投资年金和固定运行费。

(2) 约束条件。其中,抽水蓄能约束为:

$$N_{抽} H_{连} \geq E_{抽,in} + E_{抽,out} \quad (2)$$

$$E_{抽,in}/E_{抽,out} = \gamma \quad (3)$$

式中,  $N_{抽}$  为抽水蓄能装机容量;  $H_{连}$  为抽水蓄能连续满发小时数;  $E_{抽,in}$ 、 $E_{抽,out}$  分别为抽水蓄能抽、发电电量;  $\gamma$  为抽发转换效率约束。

火电约束为:

$$\omega_{min火} = \min(P_{火,i}, i = 1, 2, \dots, 730) / N_{火开机} \quad (4)$$

式中,  $\omega_{min火}$  为火电最小出力系数;  $P_{火,i}$  为火电每个月内各小时发电出力;  $N_{火开机}$  为火电开机容量。

火电技术最小出力系数约束为:

$$\omega_{min火} \geq \omega_{min火,技} \quad (5)$$

式中,  $\omega_{min火,技}$  为火电最小技术出力系数。

(3) 求解过程。火电与抽水蓄能协调运行求解过程采用分层优化方式求解,在电网负荷中扣除风光电、水电等可调节电源综合高效运行后的负荷即为残余负荷。

首先,根据储能规模、调节性能、可提供储能电站电力和抽水蓄能可发电量,在残余负荷上分析计算日内储能最大工作容量,计算火电出力系数,分析火电工作容量、备用容量。其次,根据火电出力系数与火电最小技术出力系数和火电经济出力系数的关系,调整抽水蓄能抽发电量,进而调整火电出力。当计算的火电出力系数 > 火电最小经济出力系数时,则减少抽蓄抽发电量,以节约火电燃料,计算得到新的火电出力系数,直至计算的火电出力系数 = 火电最小经济出力系数时止;当需要的火电出力超出既定的火电规模时,则按火电既定规模能力控制试算分配,若仍不能平衡时,则需增加火电规模,增加规模按最小考虑;当计算的火电出力系数介于火电最小技术出力系数与火电最小经济出力系数之间,无需调整火电出力和储能的抽发电量;当计算的火电出力系数 < 火电最小技术出力系数时,则需弃风光电量或水电汛期弃水调峰,继续调整抽蓄出力直至满足火电最小技术出力系数要求。

在调整火电出力系数过程中,火电煤耗费用及其投资均会发生变化。火电煤耗费用与火电出力峰谷差值和发电量有关,抽水蓄能抽发电量增加时,会同时产生两种效果:抽水蓄能抽发损耗增加,火电发电量增加,燃煤量增加;火电出力峰谷差减少,煤耗率降低,电量相同时燃煤量减少。

## 2.2 模型求解策略

本文提出的在考虑火电最小技术出力系数的

基础上引入火电最小经济出力系数的多能互补平衡经济分析模型,首先从系统技术、经济角度求解水电等运行方式;再量化火电与抽水蓄能运行方式;然后在满足火电、抽水蓄能技术条件和风光电合理利用的前提下,从经济性角度,以总年费用最小为基本判别条件做出决策。基本求解思路见图 3。

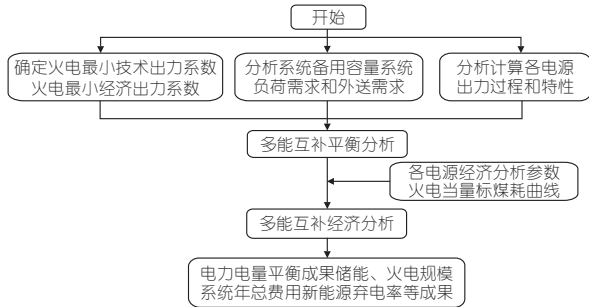


图 3 模型求解策略

Fig. 3 Model solving strategy

### 3 案例分析

#### 3.1 基础数据

(1)多能互补平衡模型初始化。某电网水能资源和煤炭资源丰富,具有一定规模的风资源和太阳能资源,由于水电开发殆尽,未来水电规模不变,根据相关规划,至 2030 年电网总装机 146 450 MW,其中水电 14 870 MW,抽水蓄能 5 000 MW,煤电 41 650 MW,光伏 60 000 MW,风电 15 000 MW,气电 1 060 MW,电化学储能 4 000 MW,生物质能及垃圾发电 1 000 MW。2030 年全社会用电量和最大负荷分别为 2 700 ×

10<sup>8</sup> kW · h、53 200 MW。电网 2025~2030 年期间外送电量和最大负荷分别为 560 × 10<sup>8</sup> kW · h、9 200 MW。根据网内电站分析,电网 2030 年火电的最小技术出力系数取 0.4。一般情况下,针对单个火电机组而言,经济运行范围在额定功率 0.70 以上,最优点为额定功率 0.95 左右,综合分析拟定方案取值范围为 0.70~0.95。

(2)经济分析模型参数。各电源边际造价根据已建电站综合分析而得;各电源的年运行费按照其边界造价的一定系数取值。火电标煤价按 1 200 元/t 计,经济折现率取 8%。该电网火电标煤耗与火电出力系数的关系见表 1。

表 1 火电标煤耗

Tab. 1 Standard coal consumption of thermal power

| 火电出力系数 | 标煤耗 / (g · kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 火电出力系数 | 标煤耗 / (g · kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> ) |
|--------|-------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|
| 1.083  | 305                                             | 0.667  | 322                                             |
| 1.000  | 307                                             | 0.583  | 330                                             |
| 0.917  | 309                                             | 0.500  | 340                                             |
| 0.833  | 311                                             | 0.417  | 353                                             |
| 0.750  | 316                                             | 0.333  | 371                                             |

#### 3.2 方案拟定

根据系统火电最小经济出力系数范围,按 6 个火电经济出力系数方案(0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95)和 10 个抽水蓄能规模方案(3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、12 000、14 000 MW),组成 60 个方案。

#### 3.3 火电最小经济出力系数分析

(1)模型计算结果。该电网多能互补平衡经济分析模型的各方案结果见表 2。

表 2 多能互补平衡经济分析模型的各项方案结果

Tab. 2 Results of various schemes of the multi-energy complementary balanced economic analysis model

| 火电最小经济出力系数 | 项目                      | 不同抽蓄规模(×10 <sup>4</sup> kW)下的取值 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------|-------------------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            |                         | 300                             | 400      | 500      | 600      | 700      | 800      | 900      | 1 000    | 1 200    | 1 400    |
| 0.70       | 总年费用/亿元                 | 1 700.38                        | 1 694.53 | 1 689.68 | 1 684.70 | 1 678.84 | 1 676.26 | 1 679.99 | 1 684.85 | 1 695.73 | 1 707.19 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 765.30                        | 4 665.30 | 4 565.30 | 4 465.30 | 4 431.30 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |
| 0.75       | 总年费用/亿元                 | 1 703.58                        | 1 695.95 | 1 690.13 | 1 685.33 | 1 679.44 | 1 676.26 | 1 679.15 | 1 683.41 | 1 693.94 | 1 705.39 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 781.60                        | 4 666.10 | 4 565.30 | 4 465.30 | 4 431.30 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |
| 0.80       | 总年费用/亿元                 | 1 703.79                        | 1 698.31 | 1 691.84 | 1 686.36 | 1 680.43 | 1 676.91 | 1 679.17 | 1 682.86 | 1 692.64 | 1 703.99 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 811.10                        | 4 693.90 | 4 565.30 | 4 465.30 | 4 431.30 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |
| 0.85       | 总年费用/亿元                 | 1 703.58                        | 1 698.66 | 1 693.02 | 1 688.33 | 1 684.71 | 1 681.68 | 1 680.27 | 1 682.88 | 1 691.99 | 1 703.16 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 811.10                        | 4 719.50 | 4 606.50 | 4 472.90 | 4 431.30 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |
| 0.90       | 总年费用/亿元                 | 1 703.38                        | 1 698.38 | 1 693.48 | 1 689.19 | 1 686.25 | 1 684.23 | 1 683.69 | 1 683.73 | 1 692.47 | 1 703.52 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 811.10                        | 4 720.30 | 4 623.70 | 4 507.90 | 4 431.30 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |
| 0.95       | 总年费用/亿元                 | 1 703.20                        | 1 698.15 | 1 693.22 | 1 689.06 | 1 686.72 | 1 684.22 | 1 683.86 | 1 684.13 | 1 692.52 | 1 703.57 |
|            | 火电装机/10 <sup>4</sup> kW | 4 811.10                        | 4 720.30 | 4 623.70 | 4 515.30 | 4 431.90 | 4 429.80 | 4 430.40 | 4 430.80 | 4 431.50 | 4 432.00 |

(2)结果分析。火电最小经济出力系数—抽水蓄能规模—总年费用的关系见图 4。图 4 表明,2030 水平年,当其他电源已定时,火电经济出力系数与抽水蓄能装机规模和火电装机规模有关。全部 60 个点,以抽水蓄能装机 8 000 MW,

火电经济出力系数 0.7~0.8 的系统总年费用基本相当,相应火电装机 4 430 × 10<sup>4</sup> kW(见表 2、图 5);该方案抽蓄及火电规模均较规划《实施方案》大,说明规划《实施方案》调整必要性。火电经济出力系数 0.70~0.80 附近方案的曲线间变化较

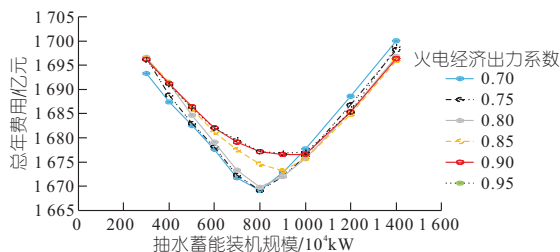


图 4 火电最小经济出力系数—抽水蓄能规模—总年费用关系

Fig. 4 Diagram of minimum economic output coefficient of thermal power-pumped storage capacity-total annual cost

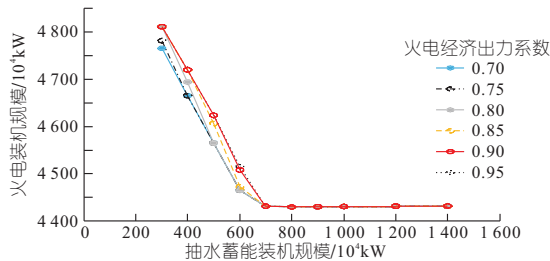


图 5 抽水蓄能规模—火电装机规模关系

Fig. 5 Relation between pumped storage capacity-installed capacity of thermal power

小,火电经济出力系数以 0.70~0.80 为优。

抽水蓄能规模—火电装机规模关系见图 5,由图 5 可知,当抽水蓄能规模较少时,火电规模需求较大,随着抽水蓄能的增加,火电需求递减,当抽水蓄能超过  $700 \times 10^4 \text{ kW}$  时,火电规模基本不变( $4430 \times 10^4 \text{ kW}$ )。因此,该电网抽水蓄能需求技术规模为  $700 \times 10^4 \text{ kW}$ ,同时需配置  $4430 \times 10^4 \text{ kW}$  的火电装机。

从火电机组与抽水蓄能规模的关系可以看出,抽水蓄能在  $300 \times 10^4 \sim 700 \times 10^4 \text{ kW}$  过程中,火电装机随之增加,当抽水蓄能超过  $700 \times 10^4 \text{ kW}$  以后,火电规模基本稳定,说明 2030 年火

电发展到  $4430 \times 10^4 \text{ kW}$  即可,此时对应的抽水蓄能规模为  $700 \times 10^4 \text{ kW}$ ,因仅考虑系统需求,未考虑经济性,此规模为抽水蓄能的技术需求规模;火电经济出力系数与抽水蓄能装机规模和火电装机规模有关,年总费用最小时抽水蓄能电站规模为  $800 \times 10^4 \text{ kW}$ ,则推荐抽水蓄能电站合理规模为  $800 \times 10^4 \text{ kW}$ ,较抽水蓄能技术需求规模大  $100 \times 10^4 \text{ kW}$ 。

## 4 结论

a. 高比例新能源并网需求下,8760 h 电力电量平衡应充分考虑火电经济出力。

b. 火电经济出力系数将直接影响抽水蓄能和火电的调峰规则,能够较为准确地对火电和抽水蓄能调峰进行优化,可得到满足电力系统需求时的抽水蓄能规模和火电规模。

c. 计及火电经济出力的抽水蓄能合理规模的论证,以系统经济性为考量目标,可为具有含火电、水电、抽水蓄能、核电、生物质、风电、光伏等多种复杂电源类型的电网提供合理的抽水蓄能合理经济规模、火电装机规模和火电经济出力系数,可提高区域电源规划的准确度,提高电网运行经济性,具有较强通用性和实用性。

## 参考文献:

- [1] 李军,黄卫剑,陈锦攀,等.一种适应新型电力系统深度调峰快速调频的工程最速控制器[J].广东电力,2021,34(8):110-119.
- [2] 杨谦,刘继春,蒋万泉.光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J].电力建设,2021,42(9):74-84.
- [3] 韩冬,赵增海,严秉忠,等.2021年中国抽水蓄能发展现状与展望[J].水力发电,2022,48(5):1-4,104.

## Prediction of Reasonable Scale of Pumped Storage Energy Considering Economic Output and Minimum Technical Output of Thermal Power

AN Li-na, FAN Guo-fu, ZHENG Dan-dan, YANG Kun

(PowerChina Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The multi-energy complementary balance model used in the demonstration of the scale of pumped storage in the new power system only considers the high cost of deep peak shaving brought about by the minimum technical output of thermal power for coal-fired unit peak shaving, ignoring the economic issue of coordinated operation between coal-fired and pumped storage units. This paper proposed to use the economic output coefficient of thermal power and the minimum output coefficient of thermal power as discriminant indicators for coordinated operation of thermal power and pumped storage, and incorporate it into the original multi-energy complementary balance analysis model. From an economic perspective, the scale of pumped storage was predicted with the minimum total annual cost as goal. Taking a certain power grid as an example, the process of demonstrating the scale of pumped storage energy was illustrated, which provides reference for similar power grid development planning and early engineering design work.

**Key words:** new energy consumption; economic peak shaving of thermal power units; multi-energy complementary balance; pumped storage energy