

用随机生产模拟方法计算抽水蓄能电站的节煤效益

白宏坤 索丽生 谈为雄

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘 要 应用随机生产模拟理论 ,建立了等效电量函数法分段模型 .从抽水蓄能的主要功能——调峰填谷作用以及较高的可靠性出发 ,以安徽琅琊山抽水蓄能电站为例 ,首先对抽水蓄能电站在电力系统中运行产生的节煤效益进行了计算和评价 ,然后对抽水蓄能电站最优运行方式进行了研究 ,从而证明了随机生产模拟方法的实用性 ,并由此得出了抽水蓄能电站的最佳运行方式 .

关键词 抽水蓄能电站 随机生产模拟方法 等效电量函数 煤耗微增率 节煤

中图号 TV734

近年来 ,抽水蓄能电站在我国蓬勃发展 ,除若干座已建、在建抽水蓄能电站外 ,还有一些抽水蓄能电站正在规划和设计之中 .由于抽水蓄能电站对电力系统的安全经济运行起着越来越重要的作用 ,因此有必要对其在电力系统中产生的效益及其最优运行方式进行研究 .

抽水蓄能电站在电力系统中运行 ,给电力系统带来了巨大的经济效益 .其中节约系统煤耗效益是其经济效益的一个重要组成部分 .本文运用随机生产模拟方法从静态上对其进行定量分析和计算 .

1 随机生产模拟方法的基本原理

随机生产模拟的具体方法有多种 ,本文采用等效电量函数法进行分析和计算 .该法特点是 ,直接用电量来进行卷积计算 ,使随机生产模拟的计算大为简化 .其基本原理如下 :

设已知研究周期 T 内系统的日负荷持续曲线 (图 1)

$$t = F(x) \tag{1}$$

则日负荷持续曲线的概率分布为 (图 2)

$$p(x) = f(x) = F(x)/T \tag{2}$$

式中 : x ——系统的日负荷值 ; t ——系统负荷大于或等于 x 的持续时间 .

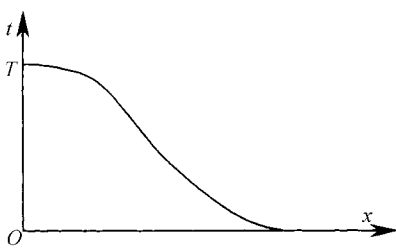


图 1 系统日负荷持续曲线
Fig. 1 Daily load duration curve of electric system

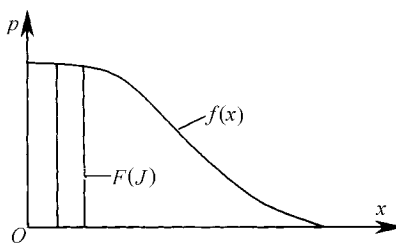


图 2 系统日负荷持续曲线的概率分布
Fig. 2 Probabilistic distribution of daily load duration curve

把 x 轴按 Δx 分段 , Δx 是所有发电机组容量的最大公因子 .定义离散的电量函数 $E(J)$,

$$E(J) = \int_x^{x+\Delta x} F(x) dx = T \int_x^{x+\Delta x} f(x) dx \tag{3}$$

其中： $J = \lfloor x/\Delta x \rfloor + 1$ ，尖括号表示取不大于 $x/\Delta x$ 的整数； $E(J)$ —— x 到 $x + \Delta x$ 段负荷对应的电量，见图 2。
设系统最大负荷为 $x_{\max}$ ，则

$$NE = \lfloor x_{\max}/\Delta x \rfloor + 1 \tag{4}$$

电力系统的总电量为

$$ED = \int_0^{x_{\max}} F(x) dx = \sum_{J=1}^{NE} E(J) \tag{5}$$

设系统原始的日负荷持续曲线概率分布为 $f^0(x)$ ，对应的电量函数为 $E^0(J)$ ，在安排第 $i-1$ 台发电机组运行以后得到的等效负荷持续曲线被修正为 $f^{i-1}(x)$ ，对应的等效电量函数为 $E^{i-1}(J)$ 。若再安排第 i 台发电机组投入运行，设其容量为 c_i ，强迫停运率为 q_i ，则等效电量函数可由如下卷积公式计算。

$$E^i(J) = p_i \cdot E^{i-1}(J) + q_i \cdot E^{i-1}(J - k_i) \tag{6}$$
$$p_i = 1 - q_i \quad k_i = c_i/\Delta x$$

1.1 系统的燃煤耗量(FMH)

安排第 i 台发电机组运行以后，第 i 台发电机组的发电量

$$Eg_i = T \cdot p_i \int_{x_{i-1}}^{x_{i-1}+c_i} f^{i-1}(x) dx = p_i \sum_{J=J_{i-1}+1}^{J_i} E^{i-1}(J) \tag{7}$$

各台发电机组生产的电量分别按上式求得后分别乘以相应的煤耗微增率，即可得出相应发电机组的发电燃煤耗量 FMH_i 。

$$FMH = \sum_{i=1}^n FMH_i = \sum_{i=1}^n Eg_i \cdot mgL(Eg_i) \text{ (万 t)} \tag{8}$$

式中： FMH_i ——第 i 台机组发电燃煤耗量； n ——系统的发电机组总台数； $mgL(Eg_i)$ ——发电机组在发 Eg_i 的电量时的煤耗微增率。

1.2 系统的电量不足期望值(EENS)

设电力系统共有 n 台发电机组，则 ED_n 即为该系统的电量不足期望值，

$$EENS = ED_n = \sum_{J>J_i} E^n(J) \text{ (万 kW} \cdot \text{h)} \tag{9}$$

1.3 系统的电力不足期望值(LOLE)

电力系统电力不足概率

$$LOLP \cong \frac{E^n(J_n) + E^n(J_n + 1)}{2T\Delta x} \tag{10}$$

电力不足期望值

$$LOLE = LOLP \times 8760 \text{ (h/a)} \tag{11}$$

2 分段模型

火发电机组的运行受其最小技术出力的限制。对于一台火发电机组来说，其中一部分容量必须在基荷位置稳定运行，另一部分容量则可以在基荷，也可以在峰荷位置变出力运行。在安排火发电机组投运优先顺序时，在峰荷位置运行的机组容量要按照其煤耗微增率的大小从小到大排序，这时同一台火发电机组基荷容量和峰荷容量的工作位置就不相邻，在安排火发电机组的投运顺序时，同一机组的基荷容量和峰荷容量的投运顺序也就不相邻。为了处理这种情况带来的影响，则采用分段模型。

以往用一个平均的单位煤耗率计算系统的燃煤耗量(式(12))，计算数值不够精确。现行方法是将火发电机组的煤耗率分为基荷煤耗微增率、峰荷煤耗微增率，以机组在基荷工作位置运行的容量的发电量乘以基荷煤耗微增率，机组在基荷区以上位置运行的容量的发电量乘以峰荷煤耗微增率得出系统的燃煤耗量(式(13))。

$$FMH = \sum_{i=1}^n Eg_i \cdot \overline{mgL_i} \tag{12}$$

$$FMH = \sum_{i=1}^n (Eg_{ji} \cdot mgL_{ji} + Eg_{fi} \cdot mgL_{fi}) \tag{13}$$

式中: Eg_{ji}, Eg_{fi} ——第 i 台发电机组在基荷(j)、峰荷(f)区工作的容量所发的电量; mgL_{ji}, mgL_{fi} ——第 i 台发电机组在基荷(j)、峰荷(f)区工作的容量在相应工作位置发电的煤耗微增率. 这样的计算结果比以往平均算法的结果精确多了.

抽水蓄能电站在电力系统中调峰填谷运行而产生的节煤效益主要表现在:

a. 原来在腰荷区工作的火电机组改为基荷区稳定满出力运行, 降低了火电机组的发电煤耗, 提高了火电利用效率, 有效地改善了火电机组的运行状况;

b. 代替一部分尖峰火电机组在峰荷区发电, 从而降低了系统的发电煤耗.

为了能精确地反映出抽水蓄能电站在电力系统中运行的具体作用, 本文将火电机组的煤耗率分为基荷煤耗微增率、腰荷煤耗微增率和峰荷煤耗微增率. 机组在基荷区、腰荷区和峰荷区运行的容量所发电量分别乘以基荷、腰荷和峰荷煤耗微增率得出系统的燃煤耗量

$$FMH = \sum_{i=1}^n (Eg_{ji} \cdot mgL_{ji} + Eg_{yi} \cdot mgL_{yi} + Eg_{fi} \cdot mgL_{fi}) \quad (14)$$

式中: $Eg_{ji}, Eg_{yi}, Eg_{fi}$ ——第 i 台机组在基荷区(j)、腰荷区(y)和峰荷区(f)工作的容量的发电量; $mgL_{ji}, mgL_{yi}, mgL_{fi}$ ——第 i 台机组在基荷区(j)、腰荷区(y)和峰荷区(f)运行时的发电煤耗微增率.

在具体安排机组投运顺序时, 应分别按照机组的腰荷、峰荷煤耗微增率的大小从小到大排序. 对这种情况的处理, 也需采用分段模型.

同一发电机组在不同负荷区的分段容量不一定在相邻位置上, 但它们在整体上均属同一台发电机组, 因此有

$$c_i = c_{ji} + c_{yi} + c_{fi} \quad (15)$$

式中: c_i ——第 i 台发电机组的容量; c_{ji}, c_{yi}, c_{fi} ——第 i 台发电机组在基荷区、腰荷区和峰荷区工作的容量.

假定对于一台发电机组, 其强迫停运率为一定值, 与其具体的运行方式、分段多少无关, 则一台机组的各分段容量具有统一的强迫停运率 q_i . 一旦机组发生强迫停运, 其在各负荷区的分段容量也都强迫停运. 机组的前一分段容量发生强迫停运, 其后面分段容量也强迫停运. 在做后一分段的卷积时, 必须消除该机组的前一分段容量强迫停运的影响, 这就要用反卷积公式来实现.

设第 $i+1$ 台机组与第 G_b 机组 (容量为 c_b) 是同一机组容量在不同负荷区的分段容量. 在安排第 $i+1$ 台机组时, 应除去第 G_b 机组随机强迫停运的影响, 反卷积公式为

$$\tilde{E}^{(i-1)}(J) = [E^{(i)}(J) - \tilde{E}^{(i-1)}(J - k_b)q_{i+1}] / p_{i+1} \quad (16)$$

其中 $k_b = c_b / \Delta x$.

3 实例分析

3.1 安徽省电网与琅琊山抽水蓄能电站简介

安徽省电网是华东电网的一部分. 截止 1994 年底, 安徽省电网参加电网调度的总装机容量为 526 万 kW, 其中火电 489 万 kW, 占总装机的 92.9%, 水电装机容量为 37.6 万 kW, 占总装机的 7.1%. 已建水电站大多是以灌溉为主的季节性电站, 调峰能力很小, 而安徽省可开发的常规水电资源很少. 近年来, 安徽电网负荷增加很快, 峰谷差也越来越大, 系统调峰容量严重不足, 高峰时要拉闸限电, 因此, 迫切需要兴建能灵活地为电网调峰填谷的抽水蓄能电站.

琅琊山抽水蓄能电站北距淮南、淮北两大火电基地分别为 120 km 和 269 km, 西距皖中负荷中心约 105 km, 南距长江北岸 220 kV 西梁山变电所约 85 km, 距滁县 220 kV 变电所仅 7.5 km. 琅琊山抽水蓄能电站的地理位置正好有利于解决皖中和蚌滁地区电源缺乏问题, 有利于安徽电网电源的合理布局, 并可有效地改善系统运行工况. 琅琊山抽水蓄能电站以日调节方式承担安徽电网调峰、填谷任务, 同时还具有事故备用、调频、调相等功能. 电站装机 4×15 万 kW*.

为了使计算结果具有一定的可比性, 本文采用文献 [1] 的数据, 见表 1.2.

* 安徽省水利水电勘测设计院. 琅琊山抽水蓄能电站可行性研究报告. 1995

表 1 安徽省电网 2003 年月最大负荷

Table 1 The monthly load duration curve of maximum load day in 2003 of Anhui electric net

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负荷/万 kW	916.2	885.4	895.4	976.9	968.0	1 018	957.9	908.8	947.7	965.6	956.6	1 004

表 2 安徽省电网 2003 年典型日负荷

Table 2 The prototype daily load curve in 2003 of Anhui electric net

时间/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
夏(8 月) 负荷/万 kW	618	609	600	609	618	645	691	800	872	827	800	709
冬(12 月) 负荷/万 kW	627.7	652.6	642.6	652.6	662.6	672.6	702.8	863.4	963.9	913.6	883.5	783.1
时间/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
夏(8 月) 负荷/万 kW	691	709	791	827	800	772	800	854	908.8	845	763	645
冬(12 月) 负荷/万 kW	763.0	803.2	853.4	893.6	883.5	923.7	1 004	953.8	863.4	783.1	722.9	682.7

3.2 对水电、抽水蓄能电站的处理

本算例为安徽省电网 ,其水电比重较小 ,多为径流式水电站 ,它们大多以灌溉、防洪为主 ,发电放水服从灌溉和防洪需要 ,不能承担正常的调峰任务 .在夏季丰水期 ,为了防洪要求 ,水电站全部容量在基荷工作 ;在冬季枯水期 ,水库用水多为灌溉用水 ,则水电站停发 ,只有陈村水电站能提供 10 万 kW 的调峰容量 .

对水电站的处理为 :在夏季 ,全部容量承担基荷 ,可在系统日负荷图上将水电工作容量减去 ;在冬季 ,陈村水电站提供 10 万 kW 调峰容量 ,其它水电站停发 ,则可利用电力电量平衡 ,在系统日负荷图上的合理位置将 10 万 kW 减去 .

对于抽水蓄能电站 ,在系统日负荷低谷处按蓄能机组的工作容量将负荷低谷填平 ,然后将蓄能机组作为煤耗率为 0 的水电机组参加系统运行 ,在系统日负荷图上安排其最佳工作位置 ,进行随机生产模拟 .

由于水电机组和抽水蓄能机组可靠性很高 ,可以设定其强迫停运率 $q = 0$,即其可用率为 100% .

3.3 基本方案

- a. 4 台抽水蓄能机组全部用于系统调峰填谷 ,火电机组用于系统旋转备用(40 万 kW);
- b. 4 台抽水蓄能机组中 3 台用于系统调峰填谷 ,1 台用于系统旋转备用 ,系统旋转备用不足部分由火电机组承担 ;
- c. 4 台抽水蓄能机组中 2 台用于系统调峰填谷 2 台用于系统旋转备用 ,系统旋转备用不足部分由火电机组承担 ;
- d. 4 台抽水蓄能机组中 ,1 台用于系统调峰填谷 ,3 台用于系统旋转备用 ;
- e. 方案 1 中的抽水蓄能机组采用火电机组替代 .

3.4 计算结果

计算结果见表 3 .
与 (替代)方案 5 相比较 ,不同方案的系统年节约煤耗值如表 4 所示 .

3.5 计算成果分析

为便于计算成果的分析 ,列出了文献 [1] 中的计算结果 ,见表 5 .

表 4 2003 年系统各方案年节约煤耗

Table 4 The yearly economization on coal consumption of each scheme in 2003

方案	1	2	3	4
节约煤耗/万 t	34.99	59.81	61.47	59.33

表 3 2003 年系统煤耗及可靠性指标

Table 3 The coal consumption and reliability indexes of electric system in 2003

方案	煤耗/万 t	LOLE/(h · a ⁻¹)	EENS/(万 kW · h)
1	2 226.29	38.212	1 151.69
2	2 201.47	54.647	1 692.26
3	2 199.81	50.225	1 636.96
4	2 201.95	60.796	2 070.62
5	2 261.28	63.709	2 148.23

表 5 文献 [1] 中的计算成果

Table 5 The calculation result of document [1]

方案	煤耗/万 t	LOLE/(h · a ⁻¹)	EENS/(万 kW · h)
1	2 306.73	76.347	1 281.01
2	2 305.09	60.4309	985.53
3	2 310.38	52.964	871.649
4	2 306.26	52.7036	927.439
5	2 311.18	230.912	3 814.381

本文的随机生产模拟方法与文献 [1] 中方法的计算成果的数值变化趋势一致.

在具体的计算过程中,本文作了以下假设:

- a. 水电机组按 3.2 处理,一部分容量较小(5 万 kW 以下)的火电机组即将退役,不参加系统运行;为简化计算,较小机组合并成一个较大的机组;
- b. 因资料有限,没有考虑安徽电网与华东电网或华东电网的其它分网之间的电力互换;
- c. 没有考虑机组的检修安排,只考虑静态的旋转备用,而没有计及动态的事故备用;在计算系统煤耗和可靠性指标时,仅从静态方面着手,并未全面地进行静态的和动态的计算;
- d. 一年中仅选两个代表月进行计算,并未逐月计算,即按冬季典型月的数据 $\times 6$ + 夏季典型月的数据 $\times 6$ 得出全年的数值.

4 结 论

- a. 由本文计算结果可知,抽水蓄能电站在电力系统中运行,可以降低整个电力系统的燃煤耗量,提高电力系统的运行可靠性,它在电力系统中的最佳运行方式是较多地承担系统的旋转备用(方案 3),此时系统节煤耗量最大,但当蓄能机组承担的旋转备用容量过大(方案 4)或过小(方案 1 和 2)时,节煤量都将下降.
- b. 本文采用的随机生产模拟方法中的等效电量函数法,计算十分方便,在计算机上运算,只需要几秒钟,即可算出一个方案结果;由于采用了分段模型,将机组的运行状况分得更细,更加精确地算出了有无抽水蓄能电站时系统的燃煤煤耗量,在此基础上得出了抽水蓄能电站在系统中产生的年节煤效益为 34.99 万 t,占替代方案(方案 5)系统年煤耗量 2261.28 万 t 的 1.55%.

参 考 文 献

1 付志奎.安徽琅琊山抽水蓄能电站经济效益分析[学位论文].北京:华北电力大学北京研究生部,1995
2 王锡凡.电力系统优化规划.北京:水利电力出版社,1990.71~180

Calculation of Economization on Coal Consumption Based on Probabilistic Simulation Modeling

Bai Hongkun Suo Lisheng Tan Weixiong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Abstract By means of probabilistic simulation modeling , a multi-model of equivalent energy function is established. Based on the main function of the pumped-storage power station—peak regulation ,and the high reliability , the economization on coal consumption in operation of the pumped-storage power station in the electric power system is calculated and evaluated ,and the operation pattern is studied ,finally , the effectiveness and applicability of this method are proved and the best operation pattern is obtained.

Key words pumped-storage power station ;probabilistic simulation of electric power system operation ; equivalent energy function method ; increment rate of coal consumption ; economization on coal consumption