

抽水蓄能电站黑启动最优预留水量

王春义¹, 刘玉田¹, 邱夕兆², 牟 宏²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061; 2. 山东电力调度中心, 山东省济南市 250001)

摘要: 在以火力发电机组为主的电网中, 为满足黑启动需要所预留水量的大小直接影响抽水蓄能电站的削峰填谷效益。为使抽水蓄能电站的综合效益最大, 提出了抽水蓄能电站的黑启动效益及黑启动所需水量的计算方法。综合考虑抽水蓄能电站的黑启动效益和静态效益, 结合削峰填谷的边际运行位置约束, 建立了抽水蓄能电站最优预留水量计算模型。以山东电网为例说明了该模型和算法的合理性。

关键词: 黑启动; 抽水蓄能电站; 最优预留水量

中图分类号: TM73; TV743

0 引言

近年来, 电力系统大停电事故时有发生, 给当地经济造成了巨大损失, 给人民生活带来了诸多不便^[1]。为了加速大停电后系统的恢复过程, 国内外专家学者对大停电事故后系统的快速黑启动问题进行了大量研究^[2-7]。由于抽水蓄能机组具有启动时间短、爬坡速度快和进相运行能力强等优点, 在以火力发电机组为主的电网中, 一般首选抽水蓄能电站作为系统的黑启动电源^[8]。除黑启动服务外, 抽水蓄能电站还必须满足削峰、填谷、调频、事故备用等各方面的需要。

为了分析抽水蓄能电站的多种系统功能, 文献^[9]对抽水蓄能电站的模型进行了详细描述, 提出了一种优化调度模型和算法。文献^[10]应用数学规划和概率方法分别建立了抽水蓄能电站的静态效益和动态效益数学模型, 以年费用和停电损失费用最少为目标, 采用等效替代法, 对抽水蓄能电站进行了效益分析。文献^[11]提出了利用系统负荷曲线及火电系统经济运行费用曲线求解抽水蓄能电站边际运行位置的数学模型。文献^[12]采用蒙特卡罗算法来构建抽水蓄能电站的生产成本模型, 并在模型的基础上提出了机组的最优发电策略和最优抽水策略。但是, 上述文献在动态效益计算模型中均未涉及黑启动服务给系统带来的效益, 在水库的运行调度方面也未考虑在满足黑启动需要情况下抽水蓄能电站的最优预留水量问题。

抽水蓄能电站为满足黑启动需要而预留水量的大小决定了黑启动机组容量的大小, 进而影响整个

系统的恢复时间。然而, 由于水库容量有限, 过多的预留水量必定影响抽水蓄能电站的削峰填谷效益。本文结合黑启动效益和削峰填谷所带来的静态效益建立目标函数, 以一个较长的时间段为计算周期来求解抽水蓄能电站的最优预留水量问题, 并以山东电网为例计算泰安抽水蓄能电站的最优预留水量。

1 数学模型

1.1 目标函数

抽水蓄能电站的效益包括动态效益和静态效益^[10]。动态效益是指抽水蓄能电站为系统提供黑启动、调频、调相、事故备用等服务给系统带来的效益, 静态效益是指抽水蓄能电站削峰填谷给系统带来的效益。由于目前国内在制定抽水蓄能电站的运行方式时, 都明确规定抽水蓄能电站的调频、调相及事故备用水量, 因此, 本文仅考虑黑启动所需水量对静态效益的影响, 在动态效益的计算方面, 也仅考虑抽水蓄能电站的黑启动效益。

抽水蓄能电站的黑启动效益为利用抽水蓄能电站作为启动电源较以其他机组作为启动电源黑启动电网时大停电损失的减少值。在大停电事故发生后, 较大的黑启动预留水量可以启动较大容量的黑启动机组, 减少电网恢复供电的时间, 从而降低大停电损失, 给系统带来较大的黑启动效益。然而, 由于抽水蓄能电站上库有效库容有限, 较大的黑启动预留水量势必影响抽水蓄能电站削峰填谷给系统带来的静态效益; 反之, 较小的预留水量会使黑启动效益减小。因此, 应当综合考虑黑启动效益和静态效益, 寻求使综合效益最大的抽水蓄能电站最优预留水量。

对于给定的黑启动方案, 黑启动电源启动时间、

设备操作时间和目标机组启动时间为定值,各时段所需的启动功率也为定值,利用各黑启动时间段的长度和所需功率可以计算相应的黑启动所需水量。另外,由于可用调峰水量为上库有效库容减去黑启动所需水量和规定的其他备用水量,因此,黑启动所需水量和可用调峰水量是以黑启动方案为变量的函数,抽水蓄能电站黑启动最优预留水量问题也就转化为寻求使综合效益最大的黑启动方案问题。

抽水蓄能电站的黑启动效益与大停电发生时间、大停电发生时系统的日负荷曲线、当年的产电比以及黑启动方案有关。静态效益与可用调峰水量、系统日负荷曲线、燃料价格有关,是系统中有抽水蓄能电站参与运行的实际机组组合方案和用火电机组代替抽水蓄能机组模拟实际运行的机组组合方案的燃料费用之差^[13]。

综上所述,可以日为积分时段建立目标函数,在一个较长的时间周期 T_c 内,寻求使抽水蓄能电站经济效益 J 最大的黑启动方案 S_{bs}' ,即

$$\max J = \int_0^{T_c} \left(I_d(S_{bs}, P(t), K(t), t) + I_s(S_{bs}, S_{uc,tp}, S_{uc,t}, P(t), P_r(t)) \right) dt \quad (1)$$

式中: I_d 为抽水蓄能电站的黑启动效益; S_{bs} 为黑启动方案; $P(t)$ 为系统日负荷曲线; $K(t)$ 为产电比; t 为大停电发生时间; I_s 为抽水蓄能电站的静态效益; $S_{uc,tp}$ 为有抽水蓄能电站参与运行的实际机组组合方案; $S_{uc,t}$ 为火电机组代替抽水蓄能机组模拟实际运行的机组组合方案; $P_r(t)$ 为燃料价格。

对应的最优预留水量 W_{bs}' 为:

$$W_{bs}' = f(S_{bs}') \quad (2)$$

1.2 约束条件

为了满足黑启动和削峰填谷的需要,抽水蓄能机组的调度必须保证其在技术上是可行的,运行是经济的,需要遵循如下约束条件。

1) 功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gi,t} \leq P_{gi,max} & \text{发电工况} \\ 0 \leq P_{pi,t} \leq P_{pi,max} & \text{抽水工况} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{gi,t}$ 和 $P_{pi,t}$ 分别为第 i 台机组在 t 时刻的发电功率和抽水功率; $P_{gi,max}$ 和 $P_{pi,max}$ 分别为第 i 台机组的最大发电和抽水功率。

2) 库容约束

$$\begin{cases} 0 \leq W_{g,t} \leq W_{u,t-1} \leq W_{u,max} & \text{发电工况} \\ 0 \leq W_{p,t} \leq W_{d,t-1} \leq W_{d,max} & \text{抽水工况} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $W_{g,t}$ 和 $W_{p,t}$ 分别为 t 时段的发电用水量和抽水量; $W_{u,t}$ 和 $W_{d,t}$ 分别为在 t 时段的最后时刻上库

和下库有效蓄水量; $W_{u,max}$ 和 $W_{d,max}$ 分别为上库和下库最大有效库容。

3) 水量平衡约束

$$\begin{cases} W_{d,t} = W_{d,t-1} + W_{g,t} & \text{发电工况} \\ W_{u,t} = W_{u,t-1} + W_{p,t} & \text{抽水工况} \end{cases} \quad (5)$$

若把 1 d 分为 24 个时段,则对于日调节抽水蓄能电站, $W_{u,24} = W_{u,0}$, $W_{d,24} = W_{d,0}$ 。

4) 能量转换约束

$$\begin{cases} E_{d,t} = E_{d,t-1} + \frac{1}{\eta} E_{g,t} & \text{发电工况} \\ E_{u,t} = E_{u,t-1} + \eta E_{p,t} & \text{抽水工况} \end{cases} \quad (6)$$

式中: η 为抽水蓄能机组综合效率; $E_{g,t}$ 和 $E_{p,t}$ 分别为 t 时段的发电量和抽水耗电量; $E_{u,t}$ 和 $E_{d,t}$ 分别为 t 时段的最后时刻上库蓄水的可发电量和将下库蓄水抽到上库需消耗的电量。

5) 边际运行位置约束

边际运行位置约束用于保证抽水蓄能电站抽水、发电的能量转换过程是经济的。

$$\begin{cases} P_g' \leq P_g & \text{发电工况} \\ P_p' \geq P_p & \text{抽水工况} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_g' 和 P_p' 分别为抽水蓄能电站的边际发电和边际抽水工作位置; P_g 和 P_p 分别为抽水蓄能电站的实际发电和抽水工作位置。

2 黑启动效益及所需水量

2.1 黑启动效益

黑启动效益即由于黑启动服务的引入使系统在发生大停电时损失的减少值。系统发生大停电后,损失值的计算方法主要有 VOLL (value of lost load) 法、平均电价折算倍数法、总拥有费用法和产电比法等^[14], 本文应用产电比法。产电比是指某一时期(年)、某一地区国民生产总值与消耗电能之比,描述了某年、某一地区单位电能创造的经济效益,是对电能货币价值的一种社会量度,可以从宏观的角度作为停电损失的近似估计。

基于产电比法,抽水蓄能电站的黑启动效益可表示为:

$$I_d = \omega p K(t) E_{loss} \quad (8)$$

式中: ω 为由于黑启动目标机组容量和位置不同,影响电网的后续恢复而引入的权重系数,其取值应以利用其他电厂作为启动电源的最优黑启动方案为基准; p 为大停电发生的概率; $K(t)$ 为产电比; E_{loss} 为以其他电厂作为启动电源的最优黑启动方案与以抽水蓄能电站作为启动电源的黑启动方案相比,在黑启动阶段供电企业多损失的售电量。

利用抽水蓄能电站和其他启动电源进行电网黑

启动所需的时间差可表示为:

$$\Delta T = T_{pr} - T_{other} \quad (9)$$

式中: T_{pr} 为以抽水蓄能电站作为黑启动电源时启动某一机组所需的黑启动时间; T_{other} 为利用其他类型机组作为黑启动电源时启动发电机组所需的黑启动时间。

将 ΔT 均分为 m 个时间段, 有

$$E_{loss} = \sum_{i=1}^m \bar{P}(t_i) t_i \quad (10)$$

式中: t_i 为第 i 个时间段的长度; $\bar{P}(t_i)$ 为负荷曲线上第 i 个时间段的平均功率需求。

2.2 黑启动所需水量

黑启动所需的预留水量是黑启动方案 S_{bs} 的函数, 与黑启动目标机组在各启动时间段所需的启动功率大小以及各启动时间段的长短有关。本文采用分层案例推理的方法生成系统的黑启动方案^[5], 确定黑启动电源、目标机组、恢复路径等详细内容。相应的黑启动时间为:

$$T = T_{bs} + T_{op} + T_{ts} \quad (11)$$

式中: T_{bs} 为黑启动电源机组的启动时间; T_{op} 为设备操作时间; T_{ts} 为目标机组的启动时间。

根据抽水蓄能机组输出功率的不同, 将黑启动时间 T 分成 n 个时段, 黑启动过程中发电用水量即为抽水蓄能电站在 n 个时段的发电用水量累加, 即

$$W_{bs} = \sum_{i=1}^n W_{bs,i} \quad (12)$$

各时段发电用水量为:

$$W_{bs,i} = \frac{P_{g,i} t_i}{9.8 \eta_{hydro,t} \eta_{hydro,g} (L_{u,i} - L_{d,i} - L_{loss})} \quad (13)$$

式中: $P_{g,i}$ 为第 i 时段的发电机出力; t_i 为第 i 时段的时间长度; $\eta_{hydro,t}$ 为水轮机效率; $\eta_{hydro,g}$ 为水轮发电机效率; $L_{u,i}$ 和 $L_{d,i}$ 分别为第 i 时段的上库水位和下库水位; L_{loss} 为水头损失。

由于不同的预留水量对应着不同的上水库水位, 因此可以采用迭代算法, 并参照抽水蓄能电站的水库水位、库容对应表求解式(13)。选择不同的目标机组及可行的黑启动路径, 利用式(12)进行计算, 即可获得该黑启动方案所需的上库预留水量及相应的上、下水库水位。

3 边际运行位置及静态效益

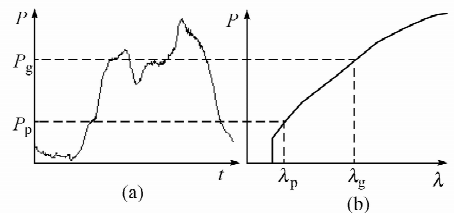
3.1 边际运行位置确定

抽水蓄能电站削峰填谷的边际运行位置是指在水库库容约束条件下抽水蓄能电站削峰填谷效益最大的机组抽水、发电运行位置。文献^[11]提出了利

用系统负荷曲线及火电系统经济运行费用曲线求解抽水蓄能电站边际运行位置的数学模型, 但并未明确火电系统经济运行费用曲线的具体生成方式。

基于微观经济学理论的边际分析法(分析当抽水蓄能电站在某调峰位置运行时机组多发出单位电能对系统静态效益的影响, 若多发出单位电能所带来的效益等于为发出单位电能而抽水所增加的成本, 则在当前调峰运行位置下系统静态效益最大), 利用系统的日负荷曲线和综合耗量微增率曲线, 可以确定使抽水蓄能电站削峰填谷效益最大的边际抽水、发电运行位置。

图1(a)为系统日负荷曲线; 图1(b)为系统中除抽水蓄能机组外, 其他发电机组的综合耗量微增率曲线。



P'_g 为发电工作位置; P'_p 为抽水工作位置; λ'_g 和 λ'_p 分别为在发电工作位置和抽水工作位置发电机组的综合耗量微增率

图1 日负荷曲线与综合耗量微增率曲线
Fig.1 Daily load curve and integrative consumption increment curve

设 B 为抽水蓄能机组调峰时单位电能所节约的煤耗, 即在 P_p 抽水对应于在 P_g 发电, 生产单位电能所节约的煤耗为:

$$B = \lambda_g - \frac{1}{\eta} \lambda_p \quad (14)$$

任意给定一调峰运行位置 P_g , 总能找到相应的抽水运行位置 P_p , 使 B 值为 0, 抽水蓄能电站只要在 P_p 之下抽水, 在 P_g 之上发电, 则能量转换过程就是经济的。显然, 满足 B 值为 0 的抽水发电运行位置有很多组, 但是实际可行的运行位置组合必须满足一定的约束, 系统在 P_p 之下可供抽水的基荷电量经能量转换后能够满足 P_g 之上调峰的需要, 即

$$E_g \leq \eta E_p \quad (15)$$

式中: E_g 为抽水蓄能电站在 P_g 之上调峰的发电量; E_p 为抽水蓄能电站在 P_p 之下抽水的耗电量。

以日最大负荷为 P_g 的初值, 利用二分查找算法, 总能找到一对使 B 值为 0 且调峰电量最大的可行运行位置 (P'_g, P'_p), 即抽水蓄能电站削峰填谷的边际运行位置, 使抽水蓄能电站在 P'_g 之上发电、在 P'_p 之下抽水对系统来说静态效益是最大的。

3.2 静态效益计算

抽水蓄能电站的静态效益可以利用等效替代法进行定量计算^[13]。根据发电机组的特点,将系统中有抽水蓄能电站参与运行的实际机组组合作为基本方案 $S_{uc,tp}$,将系统中用火电机组代替抽水蓄能机组模拟实际运行的机组组合作为替代方案 $S_{uc,t}$,2种方案的燃料费用之差即为抽水蓄能电站的静态效益。

按基本方案分配负荷时,可首先根据抽水蓄能机组的边际调峰耗水量(在边际发电位置以上调峰所需的耗水量)和可用调峰水量(为有效库容减去黑启动所需水量 W_{bs} (S_{bs}) 和规定的其他备用水量)确定抽水蓄能电站的调峰工作位置,若抽水蓄能电站的可用调峰水量小于边际调峰耗水量,则所有可用调峰水量将完全用于调峰;反之,则在抽水蓄能电站边际发电位置之上最大限度地调峰,形成抽水蓄能机组削峰填谷后的系统日负荷曲线。然后根据机组的耗量特性,在其他机组间进行负荷分配。

4 计算方法和流程

式(1)和式(2)描述的抽水蓄能电站最优预留水量问题属于非线性优化范畴,具有系统复杂、多约束、连续和整型变量混杂以及不确定等特点。常规的数学规划方法在处理此类问题时有较大的局限性。

为使问题求解简化,本文从工程需要出发,进行了如下假设:①大停电发生在系统日负荷最大的时间段;②在计算周期 T_c 内,系统日负荷、产电比、燃料价格分别按照一定比例递增;③对于给定的黑启动方案,在计算周期内抽水蓄能电站削峰填谷每年节约的煤耗保持不变。在以上假设的基础上,将黑启动效益和静态效益作为2个子问题处理。首先选取可行的黑启动方案,计算黑启动效益及所需水量,在黑启动所需水量的计算过程中考虑了功率、库容及水量平衡约束;然后在边际运行位置约束和能量转换约束下计算静态效益;最后,将黑启动效益与静态效益相加,可得当前方案的综合效益。

由于实际系统中能通过安全校验和初步选优的黑启动方案数量并不多^[5,7],因此,可以利用穷举法计算与各个可行方案相对应的抽水蓄能电站的综合效益,综合效益最大者所需的预留水量即为抽水蓄能电站的最优预留水量。

利用本文提出的数学模型和计算方法,编制了最优预留水量计算程序,计算流程图详见附录A。

5 实例分析

以山东电网为例,分别以明湖热电厂和泰安抽

水蓄能电站为黑启动电源,以黄台电厂、邹县电厂的机组为黑启动目标机组,计算泰安抽水蓄能电站在黑启动不同目标机组时的黑启动效益和静态效益,进而确定泰安抽水蓄能电站的最优预留水量。

泰安抽水蓄能电站地处山东电网中部,目前是山东境内唯一的统调水电站,部分参数如下:上库库容 1 043 万 m^3 ,下库库容 2 997 万 m^3 ,上库有效库容 890 万 m^3 ,上库蓄水位 410 m,下库蓄水位 165 m,额定水头 220 m,装机容量 4×250 MW,水轮机效率为 91%,水轮发电机效率为 94%,抽水发电综合效率为 75%,厂用电率为 0.5%。

为了计算边际运行位置、动态效益和静态效益,取山东电网 2006 年 9 月 28 日的负荷数据得到典型负荷曲线(见附录 A)。

为了满足边际运行位置计算的需要,利用菏泽电厂、聊城电厂、邹县电厂、华德电厂等 30 个电厂的发电机组耗量特性得出系统的综合耗量微增率曲线(见附录 A)。

去掉规定用于调频和事故备用的水量,泰安抽水蓄能电站实际可用于黑启动和调峰的水量为 772.2 万 m^3 。基于上述数据,利用 3.1 节提出的边际运行位置确定方法,可得抽水、发电的边际运行位置及对应于综合耗量微增率曲线上的边际煤耗率,详见附录 A。由附录 A 的表 A1 可知,边际发电耗水量为 831.8 万 m^3 ,大于实际可用于黑启动和调峰的水量。因此,除黑启动服务所需水量外,剩余可用水量都可以用来调峰。

运用分层案例推理方法^[5]生成并经过选优的可行黑启动方案如表 1 所示,相关发电机组参数详见附录 A。明湖热电厂由于没有足够的进相运行能力和输出功率,所以不能经 500 kV 线路启动邹县电厂机组,只能以黄台电厂机组为目标机组。

表 1 黑启动方案
Table 1 Black-start schemes

方案序号	黑启动路径
1	泰安抽水蓄能电站 1 号机组→泰山站→ 济南站→黄台电厂 5 号机组
2	泰安抽水蓄能电站 1 号机组→泰山站→ 济南站→黄台电厂 8 号机组
3	泰安抽水蓄能电站 1 号机组→ 泰山站→邹县电厂 3 号机组
4	泰安抽水蓄能电站 1 号机组→ 泰山站→邹县电厂 5 号机组
5	明湖热电厂 3 号机组→水电变→ 泉城变→黄台电厂 5 号机组

若以明湖热电厂作为黑启动电源,5号方案为最佳黑启动方案。表 2 给出了各方案的黑启动相关

时间,其中,机组启动时间是指机组从启动到输出最小功率所需的时间(方案5的电源机组启动时间为从机组启动到输出功率为7 MW所需的时间;抽水蓄能机组由于爬坡速度很快,因此,输出功率由0到黑启动所需功率的爬坡时间可以忽略)。由于方案1的电源启动时间与设备操作时间之和较小,所以5号机组可以进行热启动,而方案5的电源启动时间与设备操作时间之和相对较大,5号机组启动时锅炉已处于温态,因此,机组启动时间较长。

表2 黑启动相关时间
Table 2 Related black-start time

方案序号	电源机组启动时间	设备操作时间	目标机组启动时间	黑启动时间
1	2	65	120	187
2	2	65	150	217
3	2	50	150	202
4	2	50	150	202
5	50	55	180	285

表3为以抽水蓄能电站作为电源启动不同目标机组的黑启动方案与5号方案相比,30年给系统带来的黑启动效益(大停电发生的概率取0.03次/年)以及相应的静态效益。计算中,黑启动阶段的水头损失取3.6 m,计算周期内第1年煤价取300元/t,产电比取12.18元/(kW·h),煤价平均年增长率取0.03,产电比平均年增长率取0.027,负荷平均年增长率取0.08,1号和4号方案的权重系数 w 分别取1.0和0.98,2号和3号方案的权重系数 w 取0.99。

表3 泰安抽水蓄能电站效益计算结果
Table 3 Benefit results of Taian pumped storage power station

方案序号	黑启动耗水量/ 万 m ³	动态效益/ 亿元	调峰水量/ 万 m ³	每年等效节约煤耗/ 万 t	静态效益/ 亿元	综合效益/亿元
1	5.2	31.759 5	767.0	43.45	61.916 3	93.675 8
2	13.4	21.816 8	758.8	43.00	61.275 0	83.091 8
3	13.2	26.629 4	759.0	43.01	61.292 8	87.922 2
4	20.0	26.360 4	752.2	42.79	60.972 2	87.332 6

若抽水蓄能电站不提供黑启动备用(即772.2万 m³的水量完全用于削峰填谷),在没有外来电源的情况下,5号方案为最优黑启动方案,此时抽水蓄能电站给系统带来的静态效益为62.34亿元。对比表3可知,方案5不如以抽水蓄能机组作为启动电源的各方案给系统带来的动态效益、综合效益更大,因此,抽水蓄能电站提供黑启动备用时以方案1为系统的黑启动方案,从一个较长的时间周期来看,是系统的最优黑启动方案,此时泰

安抽水蓄能电站给系统带来的经济效益最大,相应的预留水量为5.2万 m³,上库水位为386.6 m,下库水位为172 m。

6 结语

综合考虑抽水蓄能电站的黑启动效益和静态效益,结合削峰填谷的边际运行位置约束,建立了抽水蓄能电站最优预留水量计算模型。将黑启动服务引入抽水蓄能电站的运行调度,完善了抽水蓄能电站的运行调度模型。以山东电网为例,计算了泰安抽水蓄能电站的黑启动效益、静态效益及最优预留水量,计算结果证实了模型、算法的合理性。

进一步完善动态效益模型,如定量引入抽水蓄能电站调频、调相、事故备用等带来的效益,寻求抽水蓄能电站的综合最佳调度运行方式,将是进一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] U. S. -Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada [R/OL]. [2007-04-01]. <http://reports.energy.gov>.
- [2] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [3] ADIBI M M, FINK L H. Overcoming restoration challenges associated with major power system disturbances: restoration from cascading failures. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(5): 68-77.
- [4] POURBEIK P, KUNDUR P S, TAYLOR C W. The anatomy of a power grid blackout: root causes and dynamics of recent major blackouts. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(5): 22-29.
- [5] 王洪涛,刘玉田,邱夕兆.基于分层案例推理的黑启动决策支持系统.电力系统自动化,2004,28(11):49-52.
WANG Hongtao, LIU Yutian, QIU Xizhao. Hierarchical case-based reasoning decision-making system for power system black start. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 49-52.
- [6] 王洪涛,刘玉田,邱夕兆,等.基于多Agent的电力系统主从递阶恢复决策.电力系统自动化,2006,30(15):5-9.
WANG Hongtao, LIU Yutian, QIU Xizhao, et al. Multi-agent based stackelberg decision for power system restoration. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 5-9.
- [7] 刘艳,顾雪平.评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法.电力系统自动化,2006,30(21):33-38.
LIU Yan, GU Xueping. Hierarchical data envelopment analysis for assessing black-start plants. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 33-38.

- [8] 江长明,闫贺群,许鹏. 华北电网黑启动试验. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 57-58.
JIANG Changming, YAN Hequn, XU Peng. The black start-up experiment of North China power grid. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 57-58.
- [9] 陈雪青,郑彤昕,石光,等. 有抽水蓄能电站的联合电力系统优化调度模型和算法. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 274-288.
CHEN Xueqing, ZHENG Tongxin, SHI Guang, et al. Model and approach of optimal operation for hydrothermal power system with pumped-storage stations. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(4): 274-288.
- [10] 徐得潜,杨善林,杨立峰,等. 抽水蓄能电站调节库容与经济效益关系的研究. 水力发电学报, 2006, 25(6): 1-7.
XU Deqian, YANG Shanlin, YANG Lifeng, et al. Research on the relations between the regulating storage volume and economic benefits of pumped-storage station. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6): 1-7.
- [11] 邓雪原,黄仕云,郑忠信,等. 抽水蓄能电站在电力系统中最佳工作位置论证. 水力发电, 2002, 28(4): 15-17.
DENG Xueyuan, HUANG Shiyun, ZHENG Zhongxin, et al. Demonstration of the best working position for pumped-storage station in power system. Water Power, 2002, 28(4): 15-17.
- [12] 龙军. 电力市场中抽水蓄能电站的生产成本评估与水库的优化

利用策略. 电网技术, 2004, 28(12): 62-65.

- LONG Jun. Production cost evaluation of pumped storage power station and optimized utilization of reservoir in electricity market. Power System Technology, 2004, 28(12): 62-65.
- [13] 万永华,张世钦,赵永生,等. 抽水蓄能电站调峰填谷节煤效益定量评估方法的研究. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 1-6.
WAN Yonghua, ZHANG Shiqin, ZHAO Yongsheng, et al. Research on methods for evaluating benefit of saving coal of a pumped storage plant by hump modulation and trough stuffing. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1998, 31(5): 1-6.
- [14] 郭永基. 电力系统可靠性分析. 北京:清华大学出版社, 2003.
GUO Yongji. Power system reliability analysis. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

王春义(1980—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制. E-mail: dmswangchy@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制及人工智能在电力系统中的应用。

邱夕兆(1963—),男,高级工程师,主要从事电力系统运行与控制方面的技术工作。

Black-start Optimal Reserved Water of the Pumped Storage Power Station

WANG Chunyi¹, LIU Yutian¹, QIU Xizhao², MU Hong²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China)

(2. Shandong Electric Power Dispatch and Communication Center, Jinan 250001, China)

Abstract: In a power grid mainly relying on the thermal generator set, the reserve water used to meet the needs of black start has a direct impact on the benefits of peak load shifting. In order to get the largest benefits of the pumped storage power station, the calculating method for black-start benefits and the required water of black-start are proposed. Considering the black-start benefits of the pumped storage power station, static benefits and the constraint of the marginal running position, the calculation model for optimal reserve water is developed. Simulation results of Shandong power grid in China show that the model and method proposed are effective.

Key words: black-start; pumped storage power station; optimal reserve water

附录 A

抽水蓄能电站最优预留水量计算流程图如图 A1 所示。

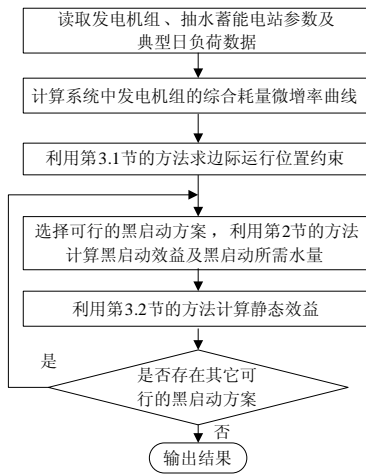


图 A1 最优预留水量计算流程

Fig.A1 Calculation flow chart of optimal reserve water

利用山东电网 2006 年 9 月 28 日的负荷数据得出的典型负荷曲线如图 A2 所示。

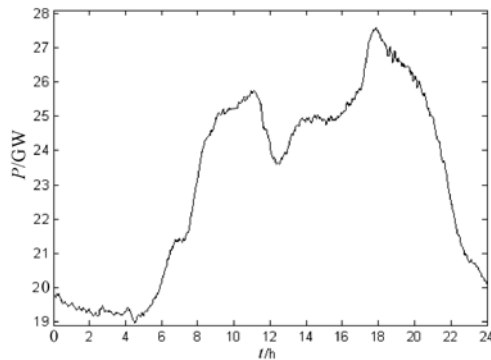


图 A2 日负荷曲线

Fig.A2 Daily load curve

火力发电机组的综合耗量微增率曲线如图 A3 所示。

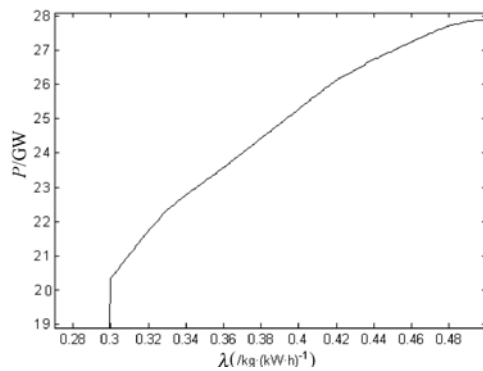


图 A3 综合耗量微增率曲线

Fig.A3 Integrative consumption increment curve

抽水蓄能电站的边际运行位置如表 A1 所示。

表 A1 边际运行位置

Table A1 Marginal running position

边际抽水位置 /MW	边际发电位置 /MW	边际发电耗水量/万m ³	边际抽水煤耗率 /(kg·(kW·h) ⁻¹)	边际发电煤耗率 /(kg·(kW·h) ⁻¹)
20230	25294	831.8	0.301	0.401

与黑启动方案相关的发电机组参数如表 A2 所示。

表 A2 发电机组参数

Table A2 Parameters of generators

机组名	额定 容量/MW	最小运行 功率/MW	启动所需 功率/MW
黄台电厂 5 号机组	100	55	7
黄台电厂 8 号机组	330	182	17
邹县电厂 3 号机组	335	168	18
邹县电厂 5 号机组	600	300	28
明湖热电厂 3 号机组	12	3	-
泰安抽水蓄能电站 1 号机组	250	-	-