

# 基于效益分析的水火电力系统短期优化调度

吴杰康, 陆文玲

(广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004)

## An Efficiency Analysis Based Short-Term Optimal Scheduling for Hydrothermal Power System

WU Jie-kang, LU Wen-ling

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** The high efficient utilization of renewable energy resource and the consumption of non-renewable energy resource are the problem to be first and foremost considered during short-term optimal scheduling of power system. In this paper, a new scheduling criterion for short-term optimal scheduling of hydrothermal power system, i.e., the summation of water consumption for the production of specific electric energy is minimum, is proposed. On this basis, an efficiency analysis based mathematical model for short-term optimal scheduling and its evaluation method are given. Firstly, a power generation model of powerstation based on the reservoir energy is built and the coal consumption function of thermal units are constructed; then by use a certain conversion standard the coal consumption of thermal units is converted into water quantity and according to the method that calculates the water consumption for the production of specific electricity quantity the water consumption for the production of specific electricity quantity in each power plant is calculated, and taking it as the criterion the short-term optimal scheduling of all thermal plants and hydropowerstations is implemented. Simulation results of Guangxi power grid consisting of eight cascade hydroelectric stations in Hongshuihe river basin and twelve thermal plants show that the proposed dispatching criterion is feasible and available.

**KEY WORDS:** hydrothermal power system; short-term scheduling; Guangxi power grid; efficiency analysis

**摘要:** 不可再生能源的消耗和可再生能源的高效利用, 是电力系统短期优化调度需首要考虑的问题。文章提出一种新的

**基金项目:** 国家 863 高技术基金项目(2007AA04Z100); 国家自然科学基金项目(50767001); 广西自然科学基金项目(桂科自 0640028); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划项目(RC20060808002); 广西壮族自治区教育厅科技计划项目(200808MS150); 广西壮族自治区研究生教育创新计划资助项目(20080808M41)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA04Z100); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50767001).

水火电力系统短期优化调度的调度准则, 即生产单位电能所需消耗水量的总和最小, 并据此给出了基于效益分析的短期优化调度数学模型及其评价方法。首先建立了基于水库能的水电站发电模型, 构建了火电机组的煤耗函数; 再把火电系统煤的消耗量通过一定的换算标准转换成水量, 根据水电系统中单位电量需消耗水量的计算方法, 计算出各个电厂生产单位电能所需要消耗的水量, 以此为准则对所有电厂进行短期发电的优化调度。以包括红水河 8 个梯级水电站和 12 个火电厂的广西电网为实例进行了仿真计算, 计算结果证明所提出的调度准则具有可行性和适用性。

**关键词:** 水火电力系统; 短期调度; 广西电网; 效益分析

## 0 引言

我国西南部的的水能资源非常丰富, 在这些省(区)水电的装机容量所占比例很大。如何更充分地利用这些现有的水能资源生产出更多的电能, 以减轻火力发电的能源消耗和因此带来的环境问题, 成为电力工作者们需要考虑的问题。

在水电装机容量和火电装机容量相当的电力系统中, 短期水火电调度的目的是在满足水电机组和火电机组相关约束的情况下, 尽可能地利用可再生并且没有污染的水能资源发电, 使火电的发电成本降低, 以减少整个系统的发电成本<sup>[1-7]</sup>。目前电力系统短期优化调度准则主要有火电总费用最小<sup>[2,4,6,8-9]</sup>、梯级水电站群发电量最大<sup>[10-11]</sup>、梯级水电站群耗水量最小<sup>[12]</sup>、电力市场中火电购电费用最低<sup>[13]</sup>、梯级水电站蓄能最大<sup>[14]</sup>、梯级发电收益最大<sup>[15-16]</sup>等等。其中, 火电费用最小的调度原则还可以细分为调度期内所有火电厂的总费用最小和调度期内所有火电机组的费用最小; 梯级水电站群发电量最大的调度准则前提是电力系统的需电量大于或至少等于梯级水电站群的发电量。

本文将在梯级水电站群耗水量最小准则的基础上, 结合效益分析<sup>[17-18]</sup>, 提出一种新的电力系统短期水火电调度准则。与以煤耗量最小为优化准则<sup>[19]</sup>不同, 本文是把火电厂的耗煤量通过一定的比例换算成水量, 考虑水电站、水电机组和火电机组的各种约束, 以调度周期内所有水电站和火电厂生产单位电量所消耗的水量总和最小为调度准则。

## 1 水能分析

在一个大型水库中, 压力引水管、水轮机、发电机等装置构成了一个高效的水机电耦合系统, 将水能转换成电能。对于该耦合系统, 水库具有的水能是指压力引水管入水口处水流所具有的动能、压能、势能和水库能。动能是压力引水管入水口处水流因具有一定流速而具有的能量; 压能是因压力引水管入水口处水流处于水库的一定深度而具有的能量; 势能是压力引水管入水口处水流因相对于水轮机出水口处具有一定的高度而具有的能量; 水库能是水库的水体对压力引水管入水口处水流施加的重力分量产生的能量。本文根据水库中储水形状的不同对水库水体进行分级建模, 将水库中的水分成3级水体, 分别为WB1、WB2和WB3, 见图1。

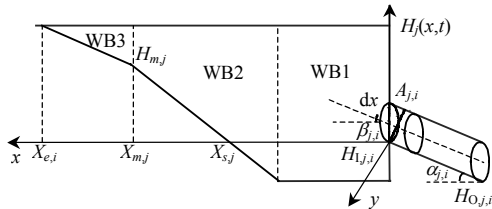


图1 水库水体的3级建模

Fig. 1 Divided water bodies of a large-scale reservoir

图1中:  $\alpha_{j,i}$  为水电站  $j$  机组  $i$  压力引水管的倾斜角;  $H_j(x,t)$  为水库  $j$  在  $t$  时间的蓄水水位;  $H_{1,j,i}$  和  $H_{0,j,i}$  分别为水电站  $j$  机组  $i$  压力引水管入水口处和出水口处相对于海平面的高程;  $A_{j,i}$  为水电站  $j$  机组  $i$  压力引水管的截面积;  $X_{s,j}$ 、 $X_{m,j}$  和  $X_{e,j}$  分别为水电站  $j$  水体 WB1、WB2 和 WB3 在  $x$  轴上的起始点;  $H_{m,j}$  为水体 WB2 最高点对海平面的高程;  $\beta_{j,i}$  指水电站  $j$  机组  $i$  压力引水管入水口处与水体 WB1、WB2、WB3 在  $z$  轴上所形成的夹角。

对于水库中的每个水机电耦合系统, 由水库中的水能转换而成的电能大小由作用于压力引水管入水口和水轮机出水口的水流大小决定。传统理论认为, 压力引水管入水口处和水轮机出水口处水流的速度、压强相等, 所以不存在水的动能和压能,

而只有压力引水管入水口处和水轮机出水口处的高差所形成的势能。在传统的水库电能形成模型中, 包括的势能没有涉及水库的形状、容量的大小、调节能力、坝深、坝宽、坝长, 以及压力引水管直径、长度、倾斜度、与水库和水轮机的联接形式等影响因素, 而这些影响因素会在很大程度上对水能转换、电能形成产生影响。本文中的水库能会将上述这些因素包含在所建模型中, 从而更直接地分析这些因素对水能转换、电能形成的影响。

由于压力引水管入水口处和水轮机出水口处水流所具有的动能、势能、压能和水库能均存在差异, 因而有一部分通过水机电耦合系统转换为电能。对于水电站  $j$  的水机电耦合系统  $i$  (即机组  $i$ ), 单位时间(例如 1s)内通过水机电耦合系统转换而成的电能可以用 kW 的形式表示:

$$E_{H,j,i}(H_j, Q_{G,j,i}) = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 \quad (1)$$

式中:  $H_j$  为水库  $j$  的蓄水水位;  $Q_{G,j,i}$  为水电站  $j$  机组  $i$  的发电流量;  $f_1$ 、 $f_2$  和  $f_3$  分别是由于机组  $i$  的压力引水管入水口和水轮机出水口处的压强、水流速度和高程不同, 而使水流所具有的压能、动能和势能, 且有

$$f_1 = 9.81[(H_j(x,t) - H_{1,j,i}) - p_{O,j,i}]Q_{G,j,i} \quad (2)$$

$$f_2 = 9.81 \cdot \frac{1}{2g} [v_{1,j,i}^2 - v_{0,j,i}^2] Q_{G,j,i} \quad (3)$$

$$f_3 = 9.81[H_{1,j,i} - H_{0,j,i}(t)]Q_{G,j,i} \quad (4)$$

$f_4$ 、 $f_5$  和  $f_6$  分别是由于水体 WB1、WB2 和 WB3 的重力对压力引水管入水口处水所形成的压力分量所做的功, 即

$$f_4 = \frac{9.81X_{s,j}Y_j[H_j(x,t) - H_{1,j,i}]}{Y_j[H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{s,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{s,j}) \cos^2 \gamma_{s,j,i} \cdot Q_{G,j,i} \quad (5)$$

$$f_5 = \frac{9.81Y_j(X_{m,j} - X_{s,j})(2H_j(x,t) - H_{m,j} - H_{1,j,i})}{2Y_j[H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{m,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{m,j}) \cos^2 \gamma_{m,j,i} \cdot Q_{G,j,i} \quad (6)$$

$$f_6 = \frac{9.81Y_j(X_{e,j} - X_{m,j})(H_j(x,t) - H_{m,j})}{3Y_j[H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{e,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{e,j}) \cos^2 \gamma_{e,j,i} \cdot Q_{G,j,i} \quad (7)$$

式中:  $p_{O,j,i}$  是压力引水管出水口处的压强;  $v_{1,j,i}$  和  $v_{0,j,i}$  分别是压力引水管入水口处和出水口处的水流速度;  $\alpha_{1,j,i}$  即图1中的  $\alpha_{j,i}$ ;  $\beta_{s,j}$ 、 $\beta_{m,j}$  和  $\beta_{e,j}$  分别为水电站  $j$  机组  $i$  压力引水管入水口处与水体

WB1、WB2、WB3在 $z$ 轴上所形成的夹角； $Y_j$ 为大坝的宽度， $\gamma_{s,j,i}$ 、 $\gamma_{m,j,i}$ 和 $\gamma_{e,j,i}$ 分别为水体WB1、WB2、WB3的重心到 $y$ 轴中心点的连线与水电站 $j$ 机组 $i$ 压力引水管入水口处所形成的夹角。

在水电站运行的一个调度周期 $T$ 内，水电站 $j$ 机组 $i$ 的出力可以表示为

$$P_{H,j,i} = E_{H,j,i} / T \quad (8)$$

对于单位时间，则有 $P_{H,j,i} = E_{H,j,i}$ 。

## 2 水耗量和煤耗量

### 2.1 水耗量

水电机组所发出电能的大小和通过压力引水管的水的流速和水的总量有很大关系，而水流速度的大小取决于其作用力的大小，水量的多少由压力引水管的大小决定。在单位时间内(例如1s)，对于特定容量的水轮机，低速的水流要求压力引水管的横截面积较大，而高速的水流则要求压力引水管的横截面积较小。由此知道，水电机组发电过程中所消耗的水量，就是从压力引水管中流下来的水量。

水流顺着压力引水管往下流，因为海拔不同、水轮机的反应不同等原因，水轮机出水口的水流速度会比压力引水管入口处的速度要小。假定压力引水管是直径为 $D_{j,i}$ 的圆形。在入水口处，在单位时间内( $dt=1s$ )，入水口处用于生产电能的水量 $W_{H,j,i}$ 可以表示为

$$W_{H,j,i} = A_{j,i} dx = A_{j,i} v_{1,j,i} dt = \pi D_{j,i}^2 v_{1,j,i} / 4 \quad (9)$$

入水口处的发电流量 $Q_{G,j,i}$ 可以表示为

$$Q_{G,j,i} = A_{j,i} dx = A_{j,i} v_{1,j,i} dt = \pi D_{j,i}^2 v_{1,j,i} / 4 \quad (10)$$

### 2.2 水耗量增长率

对于水电机组，电能的变化量可以由关于 $Q_{G,j,i}$ 的微分方程(1)得到，即

$$\Delta E_{H,j,i} = [\partial f_1 + \partial f_2 + \partial f_3 + \partial f_4 + \partial f_5 + \partial f_6] \Delta Q_{G,j,i} = \frac{\partial f_1 + \partial f_2 + \partial f_3 + \partial f_4 + \partial f_5 + \partial f_6}{T} \Delta W_{H,j,i} \quad (11)$$

其中

$$\partial f_1 = 9.8 [(H_j(x,t) - H_{1,j,i}) - p_{0,j,i}] \quad (12)$$

$$\partial f_2 = 9.81 \frac{1}{2g} [v_{1,j,i}^2 - v_{0,j,i}^2] \quad (13)$$

$$\partial f_3 = 9.81 [H_{1,j,i} - H_{0,j,i}(t)] \quad (14)$$

$$\partial f_4 = \frac{9.81 X_{s,j} Y_j [H_j(x,t) - H_{1,j,i}]}{Y_j [H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{s,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{s,j}) \cos^2 \gamma_{s,j,i} \quad (15)$$

$$\partial f_5 = \frac{9.81 Y_j (X_{m,j} - X_{s,j}) (2H_j(x,t) - H_{m,j} - H_{1,j,i})}{2 Y_j [H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{m,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{m,j}) \cos^2 \gamma_{m,j,i} \quad (16)$$

$$\partial f_6 = \frac{9.81 Y_j (X_{e,j} - X_{m,j}) (H_j(x,t) - H_{m,j})}{3 Y_j [H_j(x,t) - H_{1,j,i}]} \sin \beta_{e,j} \cos(\alpha_{1,j,i} - \beta_{e,j}) \cos^2 \gamma_{e,j,i} \quad (17)$$

水耗量的增长率可以定义为水耗量的微增量和水电机组输出电能的微增量的比率，即

$$\lambda_{H,j,i} = \frac{\Delta W_{H,j,i}}{\Delta E_{H,j,i}} = \frac{T}{\partial f_1 + \partial f_2 + \partial f_3 + \partial f_4 + \partial f_5 + \partial f_6} = \frac{T \Delta Q_{G,j,i}}{(\partial f_1 + \partial f_2 + \partial f_3 + \partial f_4 + \partial f_5 + \partial f_6) \Delta Q_{G,j,i}} = \frac{T \Delta Q_{G,j,i}}{\Delta E_{H,j,i}} \quad (18)$$

### 2.3 煤耗量

火电机组的煤耗量是该机组出力的二次函数，用公式表示为

$$F_{T,k,l} = a_{T,k,l} E_{T,k,l}^2 + b_{T,k,l} E_{T,k,l} + c_{T,k,l} \quad (19)$$

式中： $F_{T,k,l}$ 、 $E_{T,k,l}$ 分别是煤的消耗量和火电机组所发出的电能； $a_{T,k,l}$ 、 $b_{T,k,l}$ 、 $c_{T,k,l}$ 是火电机组煤耗量二次方程的系数。

### 2.4 煤耗量增长率

对于火电机组，煤耗量的微增量可以由关于 $E_{T,k,l}$ 的微分方程(19)得到，即

$$\Delta F_{T,k,l} = (2a_{T,k,l} E_{T,k,l} + b_{T,k,l}) \Delta E_{T,k,l} \quad (20)$$

煤耗量的增长率可以定义为煤耗量的微增量和火电机组输出电能的微增量的比率，即

$$\lambda_{T,k,l} = \frac{\Delta F_{T,k,l}}{\Delta E_{T,k,l}} = 2a_{T,k,l} E_{T,k,l} + b_{T,k,l} \quad (21)$$

## 3 目标函数和约束条件

### 3.1 目标函数

水是再生资源，煤是不可再生资源。因而在水火电调度中需考虑充分利用再生资源，以减少不可再生资源的消耗。将水电机组和火电机组放在同等重要的地位来进行水火电调度，通过一定的换算标准将火力发电所消耗的煤量转换成水量，再根据各个机组生产单位电能所消耗水量的大小对机组进行发电调度，生产单位电能所需耗水量小的机组优先发电。因此，本文以单位电能所消耗的水量最小为目标进行水火电优化调度，目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^T [\sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} \frac{W_{H,j,i}}{E_{H,j,i}} + \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_{TG}} \frac{\gamma_{T,k,l} F_{T,k,l}}{E_{T,k,l}}] \quad (22)$$

式中： $N_H$ 表示水电站数； $N_{HG}$ 表示水电站 $j$ 的机

组数； $N_T$  表示火电厂数； $N_{TG}$  表示火电厂  $k$  的机组数； $\gamma_{T,k,l}$  是火电厂煤耗量转换成水耗量的转换系数，且有

$$\gamma_{T,k,l} = \frac{\lambda_{H,adv}}{\Delta F_{T,k,l} / \Delta E_{T,k,l}} \quad (23)$$

其推导过程如下：

根据式(18)(21)有  $\Delta E_{T,k,l} = \frac{\Delta F_{T,k,l}}{\lambda_{T,k,l}}$ ， $\Delta E_{H,j,i} = \Delta W_{H,j,i} / \lambda_{H,j,i}$ ，当水电和煤电生产相同电能的时候， $\Delta E_{T,k,l} = \Delta E_{H,j,i}$ ，那么  $\frac{\Delta F_{T,k,l}}{\lambda_{T,k,l}} = \frac{\Delta W_{H,j,i}}{\lambda_{H,j,i}}$ ，就有  $\Delta W_{H,j,i} = \frac{\lambda_{H,j,i}}{\lambda_{T,k,l}} \Delta F_{T,k,l}$ ，所以得到  $\gamma_{T,k,l} = \frac{\lambda_{H,j,i}}{\lambda_{T,k,l}}$ 。由于有多座水电站，所以水耗量的增长率改换成各水电站水耗量增长率的平均值  $\lambda_{H,adv}$ ，其表达式为

$$\lambda_{H,adv} = \left( \sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} \lambda_{H,j,i} \right) / (N_H N_{HG}) \quad (24)$$

### 3.2 约束条件

等式约束包括：

1) 在任意时间  $t$ ，水电机组和火电机组所发出功率的总和都等于负荷所需要的电力，即电力平衡。

$$\sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} P_{H,j,i}(t) + \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_{TG}} P_{T,k,l}(t) - P_L(t) = 0 \quad (25)$$

式中  $P_L(t)$  是在任意时间  $t$  负荷所需要的电力。

2) 在调度周期  $T$  内，水电和火电机组所发出电量的总和等于负荷所需要的电量，即电量平衡。

$$\sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} E_{H,j,i}(T) + \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_{TG}} E_{T,k,l}(T) - E_L(T) = 0 \quad (26)$$

式中  $E_L(T)$  是在调度周期  $T$  内负荷所需要的电量。

不等式约束包括：

1) 水电机组的有功和无功约束。

$$P_{H,j,i} \leq P_{H,j,i} \leq \bar{P}_{H,j,i} \quad (27)$$

$$Q_{H,j,i} \leq Q_{H,j,i} \leq \bar{Q}_{H,j,i} \quad (28)$$

式中  $P_{H,j,i}$ 、 $Q_{H,j,i}$  分别是水电厂  $j$  的  $i$  号机组的有功和无功出力。

2) 火电机组的有功和无功约束。

$$P_{T,k,l} \leq P_{T,k,l} \leq \bar{P}_{T,k,l} \quad (29)$$

$$Q_{T,k,l} \leq Q_{T,k,l} \leq \bar{Q}_{T,k,l} \quad (30)$$

式中  $P_{T,k,l}$ 、 $Q_{T,k,l}$  分别是火电厂  $k$  的  $l$  号机组的有功和无功出力。

3) 发电流量约束。

$$Q_{G,j,i} \leq Q_{G,j,i} \leq \bar{Q}_{G,j,i} \quad (31)$$

式中  $Q_{G,j,i}$  和  $\bar{Q}_{G,j,i}$  分别是水电站  $j$  中机组  $i$  发电流量的下限和上限值。

4) 煤耗量约束。

$$F_{down,k} \leq \sum_{l=1}^{N_{TG}} F_{T,k,l} \leq F_{up,k} \quad (32)$$

式中  $F_{up,k}$  和  $F_{down,k}$  是火电厂  $k$  在调度周期  $T$  内煤耗量的最大和最小限制。

5) 水量约束。

$$W_{down,j} \leq \sum_{i=1}^{N_{HG}} W_{H,j,i} \leq W_{up,j} \quad (33)$$

式中  $W_{up,j}$  和  $W_{down,j}$  是在调度周期  $T$  内水电站  $j$  所消耗水量的最大限制和最小限制。

6) 水耗量和煤耗量约束。

所有火电厂的煤耗量转换而得的水耗量小于所有水电机组所消耗的水量，即

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} W_{H,j,i} > \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_{TG}} \gamma_{T,k,l} F_{T,k,l} \quad (34)$$

7) 蓄水水位约束。

在丰水期、平水期、枯水期和洪水期，蓄水水位都要求保持在一定的水位上，即

$$H_j(t) = \begin{cases} H_{LP,j}, & \text{枯水期} \\ H_{HP,j}, & \text{丰水期} \\ H_{NP,j}, & \text{平水期} \\ H_{FP,j}, & \text{洪水期} \end{cases} \quad (35)$$

8) 水能总和约束。

在任意时间  $t$ ，梯级水电站的水能总和不能小于设计值，即

$$N_{R,j} (3600 T_{\max,j,i}) \sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} E_{H,j,i}(H_j, Q_{G,j,i}) \geq E_A \quad (36)$$

式中： $N_{R,j}$  为水库  $j$  的调节能力，即调节年数； $T_{\max,j,i}$  为水电站  $j$  机组  $i$  发电年最大利用小时数； $E_A$  是梯级水电站水能总和的设计值，且有

$$E_A = N_{R,j} (3600 T_{\max,j,i}) \sum_{j=1}^{N_H} \sum_{i=1}^{N_{HG}} E_{H,j,i}(H_{D,j}, Q_{GN,j,i}) \quad (37)$$

式中  $H_{D,j}$  和  $Q_{GN,j,i}$  分别是设计的蓄水水位和水电站  $j$  机组  $i$  的正常发电流量。

9) 最小蓄水水位约束。

$$H_j(x,t) - H_{1,j,i} \geq p_{O,j,i} \quad (38)$$

## 4 效益分析

效益包括了经济效益和社会效益。本文主要是针对水火电调度中，各水电站、火电厂及所有运行机组的经济效益情况进行简要的分析。

水电站中,发电所用的水量和发出的电能的比值是一种投入和产出的比值,这个比值也是衡量水电站经济效益的一种方法。同样,火电厂中,发电所消耗的煤量和所发出电能的比值,也是衡量火电厂经济效益的一种方式。这个比例反映的是单位产出所需要消耗资源的大小,它和用最少的资源生产出最多产品的说法在理论上是相同的。若对发电资源的成本和电能的价格进行加权,则其就成为一种效益评价的指标。

本文中水火电力系统短期调度的目标函数是水电站和火电厂所有运行机组的水耗量(或煤耗量转成的水量)和发出电能的比值的总和最小化。无论是机组、单个电厂还是所有电厂,这个比值都一定程度上反映了生产单位电能所产生的发电效益。因为从原理上分析,其数值越小,生产单位电能所需要消耗的水量(或煤量)就越小,所需要投入的成本就越小,产生的效益当然就会越好。

## 5 实例计算与分析

### 5.1 实例计算及结果

本文仿真的实例是红水河 8 个梯级水电站和广西 12 个火电厂组成的水火电力系统,对其进行 24h 短期调度的仿真计算。

8 个水电站的机组数不同,分别有 4、6、3、7、

4、4、6、4 台水电机组,各水电站机组的额定出力分别为 300、200、135、600、302.5、114、32、150 MW。12 个火电厂均只有 2 台机组,前 4 个火电厂机组额定出力都为 600 MW,其他火电厂的机组额定出力分别为 300、125、360、330、220、135、300、135 MW。假定每个电站(厂)内的机组参数和发电出力都相同。

给定系统的日负荷特性,如图 2 所示。

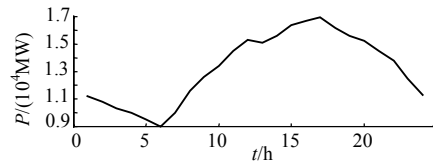


图 2 日负荷曲线

Fig. 2 Daily load curve

根据耗煤量和耗水量之间的转换关系,将火电厂生产电能所消耗的煤量转换成水量,再依据给定的负荷值,对水电出力和火电出力进行调整,使水火电系统中各个电站生产每 kWh 的电能所需要消耗的水量的总和最小,达到水火电力系统短期调度优化分配的目的。

实例仿真计算结果如表 1 所示,表中描述的是在一天中的各个时段(每 1 h 为一个时段)所有水电站、火电厂的总出力、耗水量和发电量情况。

表 1 仿真计算结果

Tab. 1 The results of simulation calculation

时段	目标函数值	负荷/MW	水电总出力/MW	火电总出力/MW	总用水量/m <sup>3</sup>	水电总用水量/m <sup>3</sup>	火电煤转水量/m <sup>3</sup>	总发电量/MWh	水电总发电量/kWh	火电总发电量/kWh
1	119.33	11 200	6 599.37	4 600.63	44 848 157.96	21 367 575.62	23 480 582.34	11 200	6 599 366.45	4 600 633.55
2	238.66	10 800	6 599.37	4 200.63	42 859 203.74	21 367 575.62	21 491 628.11	10 800	6 599 366.45	4 200 633.55
3	348.05	10 300	6 599.37	3 700.63	40 420 237.39	21 367 575.62	19 052 661.77	10 300	6 599 366.45	3 700 633.55
4	457.44	10 000	6 599.37	3 400.63	38 973 725.23	21 367 575.62	17 606 149.61	10 000	6 599 366.45	3 400 633.55
5	566.83	9 500	6 599.37	2 900.63	36 562 871.62	21 367 575.62	15 195 296.00	9 500	6 599 366.45	2 900 633.55
6	666.57	9 000	6 599.37	2 400.63	34 416 768.67	21 367 575.62	13 049 193.05	9 000	6 599 366.45	2 400 633.55
7	775.96	10 000	6 599.37	3 400.63	38 973 725.23	21 367 575.62	17 606 149.61	10 000	6 599 366.45	3 400 633.55
8	895.29	11 600	6 599.37	5 000.63	46 837 112.19	21 367 575.62	25 469 536.56	11 600	6 599 366.45	5 000 633.55
9	1 021.58	12 620	7 035.93	5 584.07	52 969 913.31	24 404 167.17	28 565 746.14	12 620	7 035 929.20	5 584 070.80
10	1 147.82	13 400	7 723.55	5 676.45	58 208 521.43	29 134 698.77	29 073 822.66	13 400	7 723 547.62	5 676 452.38
11	1 301.55	14 500	8 084.07	6 415.93	67 904 992.93	32 966 329.29	34 938 663.64	14 500	8 084 070.80	6 415 929.20
12	1 474.52	15 300	8 530.09	6 769.91	78 577 414.28	40 571 846.17	38 005 568.11	15 300	8 530 088.50	6 769 911.50
13	1 647.62	15 100	8 418.58	6 681.42	75 686 438.21	38 447 596.22	37 238 841.99	15 100	8 418 584.07	6 681 415.93
14	1 861.87	15 600	8 697.35	6 902.65	83 069 985.12	43 785 222.07	39 284 763.05	15 600	8 697 345.13	6 902 654.87
15	2 100.01	16 400	9 143.36	7 256.64	95 933 291.17	53 093 833.97	42 839 457.20	16 400	9 143 362.83	7 256 637.17
16	2 383.07	16 700	9 310.62	7 389.38	101 932 347.77	57 463 764.24	44 468 583.52	16 700	9 310 619.47	7 389 380.53
17	2 688.68	16 950	9 450.00	7 500.00	109 193 546.80	63 311 761.18	45 881 785.62	16 950	9 450 000.00	7 500 000.00
18	2 902.44	16 200	9 031.86	7 168.14	92 744 943.38	50 819 975.61	41 924 967.78	16 200	9 031 858.41	7 168 141.59
19	3 116.68	15 600	8 697.35	6 902.65	83 069 985.12	43 785 222.07	39 284 763.05	15 600	8 697 345.13	6 902 654.87
20	3 289.70	15 230	8 491.06	6 738.94	77 568 951.13	39 317 737.16	37 737 213.97	15 230	8 491 061.95	6 738 938.05
21	3 443.43	14 500	8 084.07	6 415.93	67 904 992.93	32 966 329.29	34 938 663.64	14 500	8 084 070.80	6 415 929.20
22	3 585.35	13 800	7 809.20	5 990.80	61 258 763.54	29 719 575.62	31 539 187.92	13 800	7 809 200.36	5 990 799.64
23	3 711.64	12 500	6 969.03	5 530.97	52 214 235.92	23 940 512.42	28 273 723.50	12 500	6 969 026.55	5 530 973.45
24	3 830.97	11 300	6 599.37	4 700.63	45 345 396.52	21 367 575.62	23 977 820.89	11 300	6 599 366.45	4 700 633.55

## 5.2 仿真结果分析

### 5.2.1 目标函数

目标函数值是一个比例——生产电能所消耗的水量(或所消耗的煤量转换成的水量)与所生产出来的电能的比值。也就是,生产每单位的电能(例如每 kWh)所需要消耗的水量。

从仿真结果看,目标函数值在调度周期内显现出逐渐增大的态势,而且在 24 h 中,各时段目标函数值随着负荷的增大而增大,又随负荷的减小而递减,如图 3 所示。目标函数逐渐增大,是因为其为 24 个时段的比值总和。各个时段的目标函数随着负荷的变化而变化,其原因是当负荷增加时更多的电站(厂)参与发电,而每个参与发电的电站(厂)都会有一个耗水量和发电量的比值,致使目标函数值变大。

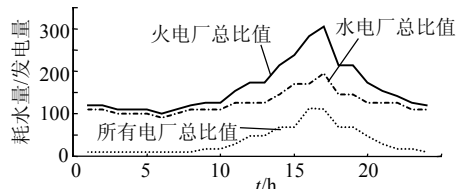


图 3 各个时段耗水量和发电量比值  
Fig. 3 Ratio of water consumption volume and electric energy

### 5.2.2 发电量

仿真结果中,在各个时段,所有火电厂的发电量总和均比所有水电站的发电量总和小,在整个调度周期中,水电站的发电量占了全部发电量的 63.83%,如图 4 所示。这很好地体现了优先发展水电、充分利用可再生能源的思想。另外,在时段 8 及之前,水电的发电量不变,而火电发电量则根据负荷的不同而不断进行调整。这说明水电在系统中承担的是基本负荷,而火电则有调峰的作用,这也充分体现了优先调度水电的环保思想。

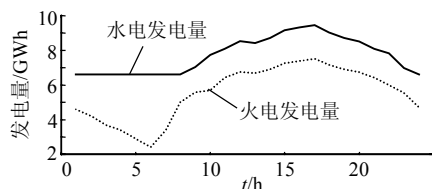


图 4 水电站和火电厂日发电量

Fig. 4 Daily electric energy output of hydroelectric power stations and thermal power plants

### 5.2.3 机组出力

以在时段 12 内各水电站和火电厂的机组出力及耗水量(或由耗煤量转换成的耗水量)情况(见表 2)为例,对机组出力情况进行分析。由仿真结果可以知道,耗水量和发电量比值小的电厂出力大,基本

表 2 第 12 时段各个发电厂的出力及耗水量情况

Tab. 2 Power output and water consumption in period 12

电站	水电站			火电站		
	比值	出力/MW	耗水量/m <sup>3</sup>	比值	出力/MW	耗水量/m <sup>3</sup>
1	3.62	4×299.96	4 338 720.00	9.64	2×600.00	5 786 048.65
2	2.51	6×200.00	3 017 655.62	7.63	2×600.00	4 577 758.96
3	11.74	3×135.00	4 754 434.49	9.94	2×600.00	5 966 862.67
4	3.34	7×599.93	14 011 200.00	8.36	2×600.00	5 017 589.07
5	6.90	4×302.46	8 352 000.00	11.00	2×300.00	3 299 855.87
6	19.30	4×78.97	6 097 836.06	45.96	2×70.93	3 259 523.10
7	0.00	6×0.00	0.00	0.00	2×0.00	0.00
8	0.00	4×0.00	0.00	15.69	2×330.00	5 176 253.37
9				0.00	2×0.00	0.00
10				0.00	2×0.00	0.00
11				17.33	2×284.03	4 921 676.41
12				0.00	2×0.00	0.00

上都是满发,说明调度原则就是耗水量和发电量比值小的电厂先发电,比值越小,发电越多,反之比值越大,就越后发电、越少发电甚至不发电。

### 5.2.4 效益分析

据表 2 对各个电站(厂)的效益情况进行分析。

水电站 1~5,火电厂 1~5 和 8 号机组均达到满发出力,用以衡量效益的耗水量和发电量的比值一定且都较小,说明这些电站(厂)生产单位电能消耗水量少,因发电所产生的效益都较高。水电站 6 号和火电厂 6、11 号机组单位电能耗水量值相对较大,机组都没有达到满发,表明这些电站(厂)的发电效益有待进一步提高。其余电站(厂)都没有发电,也就没有了效益,需要对相关系统等进行检查、改进,以期提高其发电效益。

遵循用最少的水、发出最多电的原则,使耗水量和发电量比值较小的电站(厂)优先发电、多发电,对耗水量和发电量比值较大的电站(厂),使其少发甚至不发电,体现了节约现有资源的原则。

从成本的角度来看,用耗水量和发电量的比值最小作为一种调度原则,使单位电能所耗水量较小的电站优先发电,节约了整个系统的资源,降低了生产单位电能所消耗的成本,从而使整个电力系统的发电效益上升,达到了提高发电效益的目的。

## 6 结论

1) 以单位发电量所需要消耗的水量最小为水火电系统的调度准则,在保证正常供应负荷所需电力的情况下,尽量减少需消耗的水量,同时也达到了尽量减少火电厂煤的消耗量的目的,是一种新的环保的调度方式。实例计算表明,此方法不仅可行,同时也体现了其与众不同的特点:减少了包括再生能源和不可再生能源在内的资源的消耗。

2) 在调度过程中, 火电需要将所消耗的煤量转化成水量, 因此, 对于火电系统, 如何精确适度地把耗煤量转化成耗水量, 还需要进行更为深入细致的研究。

## 参考文献

- [1] 袁晓辉, 袁艳斌, 王金文, 等. 水火电力系统短期发电计划优化方法综述[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 33-38.  
Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Wang Jinwen, et al. A survey of optimization methods for short-term generation scheduling of hydrothermal power systems[J]. Electric Power, 2002, 35(9): 33-38(in Chinese).
- [2] 谢永胜, 孙洪波, 徐国禹. 基于模糊来水量、模糊负荷的短期水火电调度[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 430-433.  
Xie Yongsheng, Sun Hongbo, Xu Guoyu. A short term hydrothermal scheduling with fuzzy inflows and loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6): 430-433(in Chinese).
- [3] 袁晓辉, 袁艳斌, 张勇传. 用改进遗传算法求解水火电力系统的有功负荷分配[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 33-36.  
Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Zhang Yongchuan. Active power dispatch of hydrothermal power system using refined genetic algorithms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 33-36(in Chinese).
- [4] 袁晓辉, 袁艳斌, 张勇传, 等. 水火电力系统短期发电计划研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 70-72.  
Yuan Xiaohui, Yuan Yanbin, Zhang Yongchuan, et al. Short-term generation scheduling for hydro-thermal power systems[J]. Huazhong University of Science & Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(4): 70-72(in Chinese).
- [5] 吴至复, 曾鸣, 刘宝华, 等. 电力市场中的水火电优化调度模型及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 45-49.  
Wu Zhifu, Zeng Ming, Liu Baohua, et al. An optimum dispatching model of hydro-thermal power system in market environment and its application[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 45-49(in Chinese).
- [6] 王亚娟, 熊信银. 基于遗传算法的水火电混合电力系统短期发电计划优化[J]. 继电器, 2000, 28(10): 21-24.  
Wang Yajuan, Xiong Xinyin. A genetic algorithm on short term optimal scheduling for a hydrothermal system[J]. Relay, 2000, 28(10): 21-24(in Chinese).
- [7] Gil E, Bustos J, Rudnick H. Short-term hydrothermal generation scheduling model using a genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1256-1264.
- [8] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Fast evolutionary programming techniques for short-term hydrothermal scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 214-220.
- [9] Wu Yonggang, Ho Chunying, Wang Dingyi. A diploid genetic approach to short-term scheduling of hydro-thermal system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1268-1274.
- [10] 李崇浩, 纪昌明, 缪益平. 基于微粒群算法的梯级水电厂短期优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 94-98.  
Li Chonghao, Ji Changming, Miao Yiping. Optimization of short-term operation of cascade hydropower stations based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 94-98(in Chinese).
- [11] 吴杰康, 郭壮志, 秦砺寒, 等. 基于连续线性规划的梯级水电站优化调度[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 24-29.  
Wu Jiekang, Guo Zhuangzhi, Qin Lihan, et al. Successive linear programming based optimal scheduling of cascade hydropower station [J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 24-29(in Chinese).
- [12] 纪昌明, 张玉山, 李继清. 市场环境下水电系统厂间经济运行问题研究[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 99-102.  
Ji Changming, Zhang Yushan, Li Jiqing. Study on inter-plant economic operation of hydroelectric system under market environment[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 99-102(in Chinese).
- [13] 蔡兴国, 林士颖, 马平. 电力市场中梯级水电站优化运行的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 6-9.  
Cai Xingguo, Lin Shiyong, Ma Ping. Study on optimal operation of cascaded hydropower plants in electricity market[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 6-9(in Chinese).
- [14] 曾勇红, 姜铁兵, 张勇传. 三峡梯级水电站蓄能最大长期优化调度模型及分解算法[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 5-8.  
Zeng Yonghong, Jiang Tiebing, Zhang Yongchuan. A long-term scheduling model for stored energy maximization of Three Gorges cascade hydroelectric stations and its decomposition algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 5-8(in Chinese).
- [15] 吴玮, 周建中, 杨俊杰, 等. 分时电价下三峡梯级电站在日前电力市场中的优化运营[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 10-14.  
Wu Wei, Zhou Jianzhong, Yang Junjie, et al. Day-ahead optimization schedules of Three Gorges cascade hydropower stations based on time-of-use electricity price[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 10-14(in Chinese).
- [16] 吴杰康, 朱建全. 机会约束规划下的梯级水电站短期优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 41-46.  
Wu Jiekang, Zhu Jianquan. A new strategy for short-term scheduling optimization of cascade hydro plants based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 41-46(in Chinese).
- [17] Dhillon J S, Parti S C, Kothari D P. Fuzzy decision-making in stochastic multi-objective short-term hydrothermal scheduling [J]. IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 191-200.
- [18] Barros C P. Efficiency analysis of hydroelectric generating plants: A case study for Portugal[J]. Energy Economics, 2008, 30: 59-75.
- [19] 尚金成, 张勇传, 岳子忠, 等. 梯级电站短期优化运行的新模型及其最优性条件[J]. 水电能源科学, 1998, 16(3): 1-9.  
Shang Jincheng, Zhang Yongchuan, Yue Zizhong, et al. The model and optimality conditions for cascaded plants short-term optimal operation[J]. International Journal Hydro Electric Energy, 1998, 16(3): 1-9(in Chinese).



吴杰康

收稿日期: 2009-01-08.

作者简介:

吴杰康(1965—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为梯级水电站群水电能源利用与调控、电力系统运行与分析、电力系统优化技术、电力市场, E-mail: wujiekang@163.com;

陆文玲(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析。

(责任编辑 李兰欣)