

# 综合环境保护及峰谷电价的水火电短期优化调度

韩冬, 蔡兴国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

## Short-Term Scheduling of Hydrothermal Power System Considering Environmental Protection and Time-of-Use Price

HAN Dong, CAI Xing-guo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** To implement the objectives of energy conservation, environment protection and high income at power generation side in electricity spot market, the relation between variation of unit output and fluctuation of time-of-use price is researched and a new short-term optimal scheduling model for hydrothermal hybrid power system is built. The objective of the proposed model is to maximize the power generation revenue, the influences of time-of-use price and the cost for environment protection are comprehensively considered and the constraints such as water storage, discharge volume and unit output of cascaded hydropower stations are taken into account, from these the optimal scheduling scheme of generation units is obtained. To remedy the defects in traditional optimal algorithms that it is difficult to deal with multi-constraints in optimal scheduling of high dimensional cascaded hydropower stations, the proposed optimal model is solved by differential evolution algorithm. Simulation results show that the proposed model is reasonable and the utilized algorithm is effective.

**KEY WORDS:** hydrothermal scheduling; time-of-use price; differential evolution algorithm; objective optimization

**摘要:** 为了使电力市场环境中的发电侧能够实现节能环保且高收益的发电目标, 对机组出力变化与分时电价波动之间的关系进行了研究, 构建了一种新的水火电短期优化调度模型, 该模型以实现电力市场条件下最大发电收益为目标, 同时综合考虑了峰谷分时电价和环境保护成本对发电侧经济效益的影响, 还考虑了梯级水电站群的蓄水量、下泄流量、机组出力等约束条件, 由此得出机组的优化调度方案。针对传统优化算法难以处理高维梯级水电站优化调度多约束条

件的缺陷, 利用微分进化算法对此优化模型进行求解, 仿真计算结果证明了该模型的合理性和算法的有效性。

**关键词:** 水火电调度; 峰谷分时电价; 微分进化算法; 目标优化

## 0 引言

电力系统中水火电联合优化调度是经济效益显著而计算比较复杂的课题。传统的水火电经济调度大多是在满足系统总负荷的前提下, 合理分配各电厂之间的负荷, 使火电系统总的燃料耗量最小<sup>[1]</sup>。由于电力市场的逐渐形成, 传统调度方式不再适应新的环境, 需要加以改进和完善。

水电厂已成为电力市场环境下的利益主体之一, 要参与市场交易, 采取科学的市场营销策略竞价上网, 制定最佳的发电报价计划, 以实现售电利润的最大化<sup>[2-3]</sup>。目前相关的研究主要集中在如何解决考虑电网潮流约束、购电成本和竞价风险的优化调度问题<sup>[3-8]</sup>, 而对电力市场中发电侧如何实现节能环保、分时电价出力优化等问题研究较少。在实现了电力市场下追求发电侧最大发电收益目标的同时, 更要考虑火电节约燃料消耗和减少污染气体排放的环保要求。本文将采用发电侧峰谷分时电价的市场策略<sup>[9-13]</sup>, 在保持平均上网电价不变的情况下, 根据分时电价的上调、下降幅度将发电机组的上网电量及其在峰、平、谷时段的电量分配问题纳入发电侧峰谷分时电价的优化设计中, 并以发电效益最大化为目标, 兼顾火电系统节能减排的环保要求, 提出一种新的水火电短期优化调度模型。

水火电短期优化调度问题是一个高维、非凸的、有时滞、非线性的优化问题。特别地梯级水电站群的优化调度问题是具有复杂约束条件的大型

**基金项目:** 高等学校博士学科点项科研基金资助项目(20050213006); 黑龙江省科技攻关项目(GD07A304)。

Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20050213006).

动态非线性规划问题，求解非常复杂<sup>[14-19]</sup>。鉴于微分进化算法鲁棒性强、可进行大范围搜索等优点，本文将采用该方法对一水火电系统进行仿真计算。

## 1 优化调度数学模型及处理方法

### 1.1 峰谷电价与电量的关系

假设某系统中水火电各机组将执行发电侧分时电价，将一个调度周期内的电量需求  $Q$ ，按峰、平、谷时段划分为  $Q_f$ 、 $Q_p$  和  $Q_g$ 。设  $\alpha$  为峰时段电价上调幅度， $\alpha > 0$ ； $\beta$  为谷时段电价下调幅度， $0 < \beta < 1$ 。

峰谷电价和峰谷电量对于发电侧应满足

$$\sum_{j=1}^{N+R} (1+\alpha)p_i^j Q_{f,j} + \sum_{j=1}^{N+R} p_i^j Q_{p,j} + \sum_{j=1}^{N+R} (1-\beta)p_i^j Q_{g,j} = \sum_{j=1}^{N+R} p_i^j Q_j \quad (1)$$

式中： $Q_{f,j}$ 、 $Q_{p,j}$  和  $Q_{g,j}$  分别表示机组  $j$  在峰、平、谷时段内的发电量； $Q_j$  表示机组  $j$  原上网的发电量； $p_i^j$  为各机组的原上网电价，并以此作为分时电价的平时段电价； $N$ 、 $R$  分别表示水电、火电机组数。设机组  $j$  在执行峰谷分时电价下整个调度周期内的发电收入增益  $\delta_j$  满足

$$\delta_j = (1+\alpha)p_i^j Q_{f,j} + p_i^j Q_{p,j} + (1-\beta)p_i^j Q_{g,j} - p_i^j Q_j \quad (2)$$

### 1.2 变量约束条件

1) 负荷平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N N_i(t) + \sum_{j=1}^R P_j(t) = P_L(t) \quad (3)$$

式中： $N_i(t)$  为梯级水电站群中第  $i$  级电站  $t$  时刻的出力； $P_j(t)$  为火电厂  $j$  在  $t$  时刻的出力； $P_L(t)$  为  $t$  时刻系统总的负荷。

2) 水量平衡约束。

$$V_i(t+1) = V_i(t) + J_i(t) - Q_i(t) - Y_i(t) + Q_{i-1}(t - \tau_{i-1}) + Y_{i-1}(t - \tau_{i-1}) \quad (4)$$

式中： $V_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  级水电站的库容； $J_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  级水电站的天然来水量； $Q_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  级水电站的发电引用流量； $Y_i(t)$  为  $t$  时刻第  $i$  级水电站的弃水量； $\tau_{i-1}$  为水流到达时间。

3) 水库蓄水量约束。

$$V_{i\min}(t) \leq V_i(t) \leq V_{i\max}(t) \quad (5)$$

式中  $V_{i\min}(t)$  和  $V_{i\max}(t)$  分别为  $t$  时段水库应保证的最小蓄水量和允许的最大蓄水量。

4) 水电站的发电引用流量约束。

$$Q_{i\min}(t) \leq Q_i(t) \leq Q_{i\max}(t) \quad (6)$$

式中  $Q_{i\min}(t)$  和  $Q_{i\max}(t)$  分别为  $t$  时段水电站应保证的最小发电引用流量和允许的最大发电引用流量。

5) 水电厂出力约束。

$$N_{i\min}(t) \leq N_i(t) \leq N_{i\max}(t) \quad (7)$$

式中  $N_{i\min}(t)$  和  $N_{i\max}(t)$  分别为  $t$  时段水电站应保证的最小出力 and 允许的最大出力。

6) 水库水头约束。

$$Y_{i\min}(t) \leq Y_i(t) \leq Y_{i\max}(t) \quad (8)$$

式中： $Y_{i\min}(t)$  和  $Y_{i\max}(t)$  分别为  $t$  时段水电站应保证的最小水头和允许的最大水头。

7) 火电厂出力约束。

$$P_{j\min}(t) \leq P_j(t) \leq P_{j\max}(t) \quad (9)$$

式中  $P_{j\min}(t)$  和  $P_{j\max}(t)$  分别为  $t$  时段火电厂应保证的最小出力 and 允许的最大出力。

### 1.3 目标函数

本文选择电力市场中水火电联合系统发电效益最大，火电厂燃料耗量最小和污染气体排放最少作为目标优化函数，即

$$\begin{cases} f_1 = \max \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^N C_i(t) N_i(t) \Delta T + \sum_{j=1}^R C_j(t) P_j(t) \Delta T] \\ f_2 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^R \lambda_j \{ \alpha_j + \beta_j P_j(t) + \gamma_j P_j^2(t) + \eta_j \exp[\delta_j P_j(t)] \} \\ f_3 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^R [a_j + b_j P_j(t) + c_j P_j^2(t)] \end{cases} \quad (10)$$

式中： $C_i(t)$  为梯级水电站群中第  $i$  级电站  $t$  时刻的电价； $C_j(t)$  为火电系统  $t$  时刻的电价； $\Delta T$  为时间差； $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$  是火电厂  $j$  的燃料耗量特性系数； $\alpha_j$ 、 $\beta_j$ 、 $\gamma_j$ 、 $\eta_j$ 、 $\delta_j$  是火电厂  $j$  的气体排放特性系数； $\lambda_j$  是污染物排放的环境价值系数，元/lb。 $f_1$  表示水火电系统发电经济效益最大函数； $f_2$  表示火电系统污染气体排放最小函数<sup>[20]</sup>； $f_3$  表示火电系统燃料耗量最小函数<sup>[21]</sup>。

### 1.4 目标函数的处理

对于目标函数采用变量惩罚函数法，使惩罚系数随着迭代次数的增加而动态增大，这样可以避免解的质量严重依赖惩罚系数的值。水火电系统优化调度的适应度函数为

$$F_1 = f_1 - \sum_{k=1}^2 \lambda_k V_k \quad (11)$$

式中  $\lambda_k$  为惩罚系数，随着迭代次数增加而增大，惩罚函数分别为

$$V_1 = \sum_{t=1}^T |P_L(t) - P(t) - N(t)| \quad (12)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [\max(Y_{i\min}(t) - Y_i(t), 0) + \max(Y_i(t) - Y_{i\max}(t), 0)] \quad (13)$$

式(12)中  $P(t)$ 、 $N(t)$ 为火电、水电的总出力。

火电系统具有惩罚函数的目标适应度表达式为

$$F_2 = f_2 + f_3 + \sum_{k=1}^2 \lambda_k V_{2k} \quad (14)$$

其中惩罚函数分别为

$$V_{21} = \sum_{t=1}^T \left| P(t) - \sum_{j=1}^R P_j(t) \right| \quad (15)$$

$$V_{22} = \sum_{j=1}^R \sum_{t=1}^T [\max(P_{j\min}(t) - P_j(t), 0) + \max(P_j(t) - P_{j\max}(t), 0)] \quad (16)$$

## 2 求解方法及步骤

### 2.1 微分进化算法

#### 2.1.1 算法简介

微分进化(differential evolution, DE)算法是由 Storn 和 Price 在 1995 年提出的一种高效率的智能优化计算方法。该算法源于遗传算法,但由于不需进行编码和解码操作,使用上大为简化;同时它对初始值无要求,收敛速度快,对各种非线性函数适应性强,尤其适应于多变量复杂问题的寻优,对解决梯级水电站调度这类大规模、带有大量约束条件的非线性规划问题非常有效。

#### 2.1.2 初始化

设第  $i$  个个体  $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,D})$ ,  $D$  为解空间的维数,初始种群  $S = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$  为个体的集合。个体向量  $\mathbf{X}_i$  各分量的产生方式为

$$x_{i,j} = x_{i,j\min} + \text{rand}() \cdot (x_{i,j\max} - x_{i,j\min}) \quad (17)$$

式中:  $x_{i,j}$ 、 $x_{i,j\max}$ 、 $x_{i,j\min}$  分别为个体向量  $\mathbf{X}_i$  的第  $j$  个分量及其上下限;  $\text{rand}()$  为区间(0,1)中的随机数。

#### 2.1.3 变异

对于第  $k+1$  代每个目标向量  $\mathbf{X}_i^{k+1}$ , 变异向量  $\mathbf{V}_i^{k+1} = (v_{i,1}^{k+1}, v_{i,2}^{k+1}, \dots, v_{i,D}^{k+1})$ , 其分量产生方式为

$$v_{i,j}^{k+1} = x_{r1,j}^k + F(x_{r2,j}^k - x_{r3,j}^k) \quad (18)$$

式中  $x_{r1,j}^k$ 、 $x_{r2,j}^k$ 、 $x_{r3,j}^k$  是从第  $k$  代除  $\mathbf{X}_i^k$  之外的个体中随机选取出来的 3 个不同向量的第  $j$  个分量; 系数  $F$  为控制微分量参数。通过变异操作产生的新向量为后两个变量的差值与比例因子  $F$  作用后,再

与第一个向量的和。

#### 2.1.4 交叉

交叉的目的是增加干扰参数向量的多样性,交叉操作使得由源向量和变异向量生成目标向量  $\mathbf{U}_i^{k+1} = (u_{i,1}^{k+1}, u_{i,2}^{k+1}, \dots, u_{i,D}^{k+1})$ , 其各个分量计算公式为

$$u_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{k+1}, & \text{rand}() \leq C_R \text{ 或 } j = I_{\text{rand}} \\ x_{i,j}^k, & \text{其它} \end{cases} \quad (19)$$

式中  $I_{\text{rand}}$  是从  $[1, D]$  中随机选取的一个整数,用以保证本次操作必须有 1 位经过交叉。

#### 2.1.5 选择

当且仅当新个体的评价函数值更好时,才能被保留到下一代群体中,否则,父个体仍然保留在群体中,再一次作为下一代的父向量。选择方式为

$$\mathbf{X}_i^{k+1} = \begin{cases} \mathbf{U}_i^{k+1}, & f(\mathbf{U}_i^{k+1}) \geq f(\mathbf{X}_i^k) \text{ 或 } f(\mathbf{U}_i^{k+1}) \leq f(\mathbf{X}_i^k) \\ \mathbf{X}_i^k, & \text{其它} \end{cases} \quad (20)$$

式中:当评价函数取最大值时,满足条件  $f(\mathbf{U}_i^{k+1}) \geq f(\mathbf{X}_i^k)$  有  $\mathbf{X}_i^k = \mathbf{U}_i^{k+1}$ ; 当评价函数取最小值时,满足条件  $f(\mathbf{U}_i^{k+1}) \leq f(\mathbf{X}_i^k)$  有  $\mathbf{X}_i^k = \mathbf{U}_i^{k+1}$ 。

#### 2.1.6 DE 算法的控制参数

控制参数的选择对算法的搜索性能有较大的影响。文献[21]指出比例因数  $F$  和交叉因数  $C_R$  在进化过程中的取值区间一般分别为[0.4, 0.9]和[0.3, 0.8]。为了加强 DE 的全局搜索能力,以防止收敛于局部最优解,本文采用了控制参数自适应调整策略:

$$F^{(k)} = F_{\max} - \frac{F_{\max} - F_{\min}}{E_{\max}} k \quad (21)$$

$$C_R^{(k)} = C_{R\max} - \frac{C_{R\max} - C_{R\min}}{E_{\max}} k \quad (22)$$

## 2.2 模型的求解步骤

根据以上数学模型, DE 算法具体步骤为:

1) 算法参数初始设置。设置种群规模  $N$ , 输入问题的空间维数  $D$ , 最大迭代次数  $E$  及控制参数  $F$  和  $C_R$  的上下限值等。

2) 种群初始化。将火电系统等值成一个火电机组,以等值后的火电出力和梯级水电站中的各级电站的发电引用流量作为决策变量。在控制变量变化范围内随机生成  $N$  个解,并设当前迭代次数  $k$  为 1。

3) 利用等式及不等式约束条件检验并调整所生成的种群中的每一个个体,使所有的个体均满足约束条件,从而形成可行解空间。

4) 按式(11)计算目标函数适应度值  $F_1$ , 取其中

最大值作为群体当前的最优解。

5) 判断当前迭代次数  $k$  是否到达最大迭代次数  $E$ , 若不满足条件, 置迭代次数  $k=k+1$ ; 若满足条件, 转至步骤 7)。

6) 根据上述结果分别对种群进行变异和交叉操作。然后进行选择操作, 得到此时的最优解, 转至步骤 5)。

7) 输出最优解。得到各时段下火电系统的总的有功出力及梯级水电站每一级的发电引用流量。并计算各时段每一级水电站的有功出力。

8) 将得到的火电系统总的有功出力, 按照式(14)中  $F_2$  为目标函数适应度, 取其最小值作为最优解, 分配各火电厂的有功出力。

### 3 算例分析

#### 3.1 基础数据

以一 3 级梯级水电站和 3 个火电厂组成的系统为例验证本文提出的模型和算法。其中上游水电站 A 为年调节性电站, B 电站和 C 电站为季调节性电站, 调度周期为 24h, 1h 为一个时段。系统数据见表 1、2。本文考虑了梯级水电站群运行中变水头的影响和连续两级水库之间所形成水流时滞的影响。水、火电上网电价分别为 315 元/MWh 和 330 元/MWh。根据所给出的系统各时段的负荷, 划分出峰时刻为 [10:00, 16:00] 和 [20:00, 22:00], 谷时刻为 [1:00, 9:00], 平时刻为 [17:00, 19:00] 和 [23:00, 24:00], 方括号内 2 个时刻表示起止时刻, 中间的时刻取值均

表 1 水电站参数

Tab. 1 Parameters of hydro plants

参 数	A 电站	B 电站	C 电站
$V_{max}/(\text{亿 m}^3)$	145.57	9.20	9.33
$V_{min}/(\text{亿 m}^3)$	98.95	2.57	2.75
$N_{max}/\text{MW}$	4 200	1 500	1 350
$N_{min}/\text{MW}$	0	0	0
$Q_{max}/(\text{m}^3/\text{s})$	3 101.6	2 000	1 410.7
$Q_{min}/(\text{m}^3/\text{s})$	0	0	0
$\eta$	8.81	8.2	8

表 2 火电厂参数

Tab. 2 Parameters of thermal plants

参 数	1 电厂	2 电厂	3 电厂
$a/(\text{元}/\text{h})$	100	120	150
$b/(\text{元}/\text{MWh})$	2.45	2.32	2.10
$c/(\text{元}/(\text{MW})^2\text{h})$	0.001 2	0.001 0	0.001 5
$\alpha/(\text{lb}/\text{h})$	60	45	30
$\beta/(\text{lb}/\text{MWh})$	-1.355	-0.600	-0.555
$\gamma/(\text{lb}/(\text{MW})^2\text{h})$	0.010 5	0.008 0	0.012 0
$\eta/(\text{lb}/\text{h})$	0.491 8	0.486 0	0.503 5
$\delta/(\text{1}/\text{MWh})$	0.019 25	0.016 94	0.014 78
$P^{min}/\text{MW}$	20	40	50
$P^{max}/\text{MW}$	1 000	500	1 000

为整点。在本文的 DE 算法中各参数的取值为: 算法的群体规模  $N=50$ ; 最大迭代次数  $E=200$ ; 比例因子  $F$  的上下限值  $F_{max}=0.9, F_{min}=0.4$ ; 交叉因子  $C_R$  系统的出力上下限值为 2 500 MW 和 110 MW, 梯级水电站中各级电站的发电引用流量上下限值见表 1。算法采用 Matlab 编程实现。

#### 3.2 优化结果

在满足库容、机组出力、水头、发电引用流量等约束条件的基础上, 以获得最大发电效益为目标, 进行优化调度, 结果取最优值。

图 1 为梯级水电站群满足发电效益最大情况下的出力曲线, 图 2 为节能减排下火电系统优化调度的目标适应度进化曲线, 图 3 为水火电系统优化调度的目标适应度进化曲线。

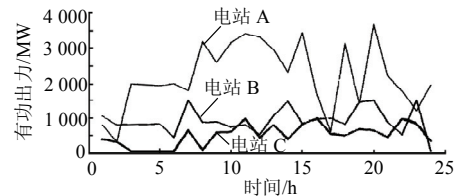


图 1 梯级水电站群出力分配优化

Fig. 1 Optimal power generation curve of cascaded hydropower plants

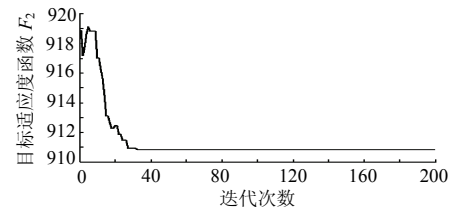


图 2 节能减排下火电系统目标适应度  $F_2$  迭代曲线

Fig. 2 Objective fitness curve for thermal plants on condition of minimizing the thermal fuel cost and contaminative gas emission

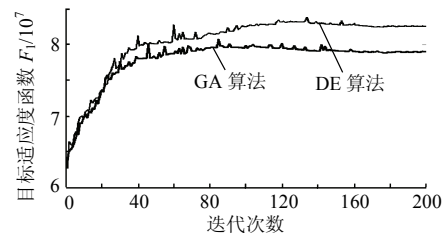


图 3 两种算法的目标适应度  $F_1$  迭代曲线

Fig. 3 Curves for objective fitness of the two algorithms

图 3 表明 DE 算法具有较强的鲁棒性, 与遗传算法(genetic algorithm, GA)相比, 无论是搜索效率, 还是收敛稳定性均具有更好的寻优性能。

取谷时段电价下调幅度  $\beta$  分别为 [0.1, 0.9] 之间的数值, 经计算可以得到一个调度周期内相应峰时段电价上调幅度  $\alpha$ , 火电系统燃料及污染气体排放

所消耗的费用和水火电机组在峰、平、谷时段的发电净收入。数据结果见表 3。

从表 3 可以看出, 根据不同的需求(火电系统的节能减排最小要求或者水火电系统总的发电收益最大要求), 适当地选取电价调整幅度来满足不同的目标。表 4 给出水火电系统电价下调幅度 $\beta$ 取值为 0.3 时的日调度计划, 表中包括了水火电系统各时段的有功出力及梯级水库容量的变化值。可以看出: 当负荷处于峰时段时, 机组增大有功出力; 负荷处于谷时段时, 机组减小有功出力。因此, 整个调度周期内水火电系统调度计划是合理的。

表 3 峰谷电价调整幅度与水火电机组在峰、平、谷时段的发电净收入

Tab. 3 The adjustment range of price and the economic profits of thermal and hydro plants in peak, midst and valley periods

$\beta$	$\alpha$	火电燃料及气体排放所消耗费用/元	净收入/元	
			火电	水电
0.1	1.048 1	21 587	6.080 6×10 <sup>6</sup>	7.934 5×10 <sup>7</sup>
0.2	1.096 1	14 928.1	6.380 4×10 <sup>6</sup>	7.684 8×10 <sup>7</sup>
0.3	1.144 2	10 728.9	7.180 7×10 <sup>6</sup>	7.215 1×10 <sup>7</sup>
0.4	1.192	18 247.8	6.199 6×10 <sup>6</sup>	7.647 8×10 <sup>7</sup>
0.5	1.240 3	12 584.5	6.466 4×10 <sup>6</sup>	7.389 0×10 <sup>7</sup>
0.6	1.288 4	14 337.1	6.396 7×10 <sup>6</sup>	7.1212×10 <sup>7</sup>
0.7	1.336 4	19 194	6.173 4×10 <sup>6</sup>	7.444 9×10 <sup>7</sup>
0.8	1.384 5	20 758	6.011 7×10 <sup>6</sup>	7.566 4×10 <sup>7</sup>
0.9	1.432 6	11 070.6	6.945 4×10 <sup>6</sup>	7.1974×10 <sup>7</sup>

表 4 日调度计划

Fig. 4 Scheduling plan for one day

时段	水电系统出力/MW	火电系统出力/MW	水库容量/(亿 m <sup>3</sup> )		
			A	B	C
1	2 757.8	115.34	110.010 0	3.500 0	3.500 0
2	2 998	112.5	110.011 7	3.500 8	3.500 2
3	2 900.7	1 996.5	110.013 0	3.501 7	3.500 5
4	2 087.8	115.14	110.014 4	3.502 6	3.500 1
5	2 888.1	2184.1	110.016 2	3.502 6	3.500 6
6	1 602.8	113.14	110.018 5	3.502 6	3.500 5
7	2 914.7	1 200.5	110.019 4	3.503 1	3.501 3
8	3 561	1 221.4	110.021 2	3.503 9	3.501 2
9	3 793.9	114.18	110.022 0	3.505 5	3.500 9
10	4 357.8	2 498.5	110.024 3	3.506 0	3.500 8
11	4 025.8	1 964.8	110.024 7	3.506 9	3.501 1
12	3 968.6	2 496	110.026 6	3.506 4	3.501 6
13	3 952.1	2 490.9	110.028 7	3.506 2	3.501 5
14	3 672.6	2 493.7	110.030 4	3.506 1	3.501 4
15	4 107.2	2 489	110.032 3	3.505 9	3.501 6
16	3 931.5	2 485.5	110.034 1	3.506 0	3.502 2
17	3 406.3	2 498.8	110.035 5	3.506 2	3.503 0
18	3 860.9	2 499.1	110.036 7	3.507 4	3.503 3
19	4 880.2	1 149.4	110.037 6	3.508 0	3.503 8
20	5 651.4	797.75	110.038 3	3.508 9	3.504 4
21	4 260.3	2 489.4	110.039 4	3.508 9	3.504 9
22	4 202.6	2 498.5	110.041 5	3.508 6	3.505 7
23	5 383.5	2 491.8	110.043 3	3.508 2	3.506 0
24	3 313.8	2 489.7	110.045 2	3.508 8	3.505 6

## 4 结论

本文提出的水火电短期优化调度模型考虑了电力市场中峰谷分时电价及火电系统环境保护成本对发电效益的影响, 并且运用微分进化算法进行求解。与现有的水火电短期优化调度方法相比, 所提出的模型能够更加全面而又实际地反映出当前市场环境下的水火电短期优化调度问题, 即根据不同的需求(火电系统的节能减排最小要求或者水火电系统总的发电收益最大要求), 适当地选取电价调整幅度来满足不同的目标, 得出合理的调度计划。为水火电短期优化调度问题的解决提供了一条新的思路。同时仿真结果表明本文提出的微分进化算法在实现水火电短期优化调度方面具有一定的优势, 计算中考虑了短期调度中的各种约束条件, 该算法无论在搜索效率还是收敛稳定性方面均优于其它算法。

## 参考文献

- [1] 张勇传. 水电站经济运行原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 25-30.
- [2] Arroyo J M, Conejo A J. Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market[J]. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(3): 1098-1104.
- [3] 蔡兴国, 林士颖, 马平. 现货交易中梯级水电站竞价上网的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 56-59. Cai Xingguo, Lin Shiyong, Ma Ping. Study on bidding price of cascaded hydro plants in spot transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 56-59(in Chinese).
- [4] Wang Lingfeng, Singh C. Adequacy-based design of a hybrid generating system including intermittent sources using constrained particle swarm optimization[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [5] Manuel A J, Villamor F A. Self-scheduling of a hydro producer in a pool-based electricity market[J]. IEEE Trans on System, 2002, 17(4): 1265-1271.
- [6] Fuentes-Loyola R, Quintana V H. Medium-term hydrothermal coordination by semidefinite programming[J]. Power System Technology, 2004, 18(4): 1515-1522.
- [7] Jabr R A. Robust self-scheduling under price uncertainty using conditional value-at-risk[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1852-1858.
- [8] 刘盛松, 邵能灵, 侯志俭, 等. 基于最优潮流与模糊贴近度的电力系统环境保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 22-26. Liu Shengsong, Tai Nengling, Hou Zhijian, et al. Study on environmental protection of power systems based on optimal power flow and fuzzy nearness[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 22-26(in Chinese).
- [9] 谭忠富, 陈广娟, 乞建勋, 等. 基于电力资源优化配置的发电侧峰谷分时电价研究[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 61-65. Tan Zhongfu, Chen Guangjuan, Qi Jianxun, et al. Research on time-of-use price at generation side based on optimal configuration of

- power resources[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 61-65(in Chinese).
- [10] 王锦斌, 谭忠富, 张蓉, 等. 发电侧峰谷分时电价设计及电量分配优化模型[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 16-20.  
Wang Mianbin, Tan Zhongfu, Zhang Rong, et al. Design of time-of-use power price at generation side and optimal model of electricity distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 16-20(in Chinese).
- [11] 陈芳元, 赵方方, 刘万军. 发电侧与销售侧峰谷分时电价联动方案研究[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(9): 11-13.  
Chen Fangyuan, Zhao Fangfang, Liu Wanjuan. Scheme research on the linkage of the peak and off-peak TOU price between generation and sale side[J]. Power Demand Side Management, 2006, 8(9): 11-13(in Chinese).
- [12] 刘友波, 刘俊勇, 唐杰明. 计及需求侧电量电价弹性矩阵与风险的供电公司周市场购电优化决策模型[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 18-24.  
Liu Youbo, Liu Junyong, Tang Jieming. An optimal decision-making model for power supply company's power purchase in weekly market considering price elasticity matrix of demand side and risk[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 18-24(in Chinese).
- [13] 贾燕冰, 严正, 杨立兵, 等. 电力市场中的电价动态特性及灵敏度分析[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 101-106.  
Jia Yanbing, Yan Zheng, Yang Libing, et al. Dynamic character and sensitive analysis of power price in electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 101-106(in Chinese).
- [14] 谢红胜, 吴相林, 陈阳, 等. 分时电价下梯级水电站间短期优化调度仿真[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 114-117.  
Xie Hongsheng, Wu Xianglin, Chen Yang, et al. Short-term optimization scheduling among the cascaded hydroelectricity plants in zonal time price[J]. Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(3): 114-117(in Chinese).
- [15] 梁伟, 陈守伦, 何春元, 等. 基于混沌优化算法的梯级水电站水库优化调度[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 63-66.  
Liang Wei, Chen Shoulen, He Chunyuan, et al. Optimal operation of cascaded hydropower stations based on chaos optimal algorithm [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1): 63-66(in Chinese).
- [16] Lakshminarasimman L, Subramanian S. Short-term scheduling of hydrothermal power system with cascaded reservoirs by using modified differential evolution[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(6): 693-700.
- [17] 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).
- [18] 刘嘉佳, 刘俊勇, 帅颖, 等. 计及动态一致性风险度量的水电短期优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 94-99.  
Liu Jiajia, Liu Junyong, Shuai Ying, et al. Short-term optimal regulation of hydropower plants with dynamic coherent risk measures [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 94-99(in Chinese).
- [19] 王晔, 李渝曾, 张少华. 一种求解环境经济负荷调度问题的人工神经网络新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 45-48.  
Wang Xian, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. A new artificial neural network approach to economic emission load dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 45-48(in Chinese).
- [20] 于尔铿, 周京阳, 吴玉生. 发电报价曲线研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 23-26.  
Yu Eren, Zhou Jingyang, Wu Yusheng. A study on generator bidding curves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 23-26 (in Chinese).
- [21] 刘自发, 张建华. 一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 100-105.  
Liu Zifa, Zhang Jianhua. An improved differential evolution algorithm for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 100-105(in Chinese).



韩冬

收稿日期: 2008-11-19。

作者简介:

韩冬(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济调度及人工智能在电力系统中的应用, E-mail: qbilia@163.com;

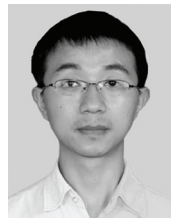
蔡兴国(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统 IT。

(责任编辑 李兰欣)

(上接第 51 页 continued from page 51)

- [12] 彭建春, 江辉, 成连生. 复功率电源的支路功率分量理论[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 1-5.  
Peng Jianchun, Jiang Hui, Cheng Liansheng. Theory of branch complex power components incurred by individual generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 1-5(in Chinese).
- [13] Peng J C, Jiang H, Song Y H. A weakly conditioned imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2124-2133.
- [14] DL755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [15] 杨帮宇, 彭建春, 代红才, 等. 750kV 长线路中间动态无功补偿的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 16-20.  
Yang Bangyu, Peng Jianchun, Dai Hongcai, et al. Research on dynamic power compensation at middle of 750kV long distance transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 16-20(in Chinese).
- [16] Yan X H, Quintana V H. Improving an interior-point-base OPF by

dynamic adjustments of step sizes and tolerances[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 709-717.



杨帮宇

收稿日期: 2008-11-06。

作者简介:

杨帮宇(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: duoluoyu@yahoo.com.cn;

彭建春(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统优化运行、控制的研究, E-mail: jcpeng@163.com;

江辉(1968—), 女, 教授, 从事电力系统优化运营、电力系统经济的研究, E-mail: huijiang1092@hotmail.com.

(责任编辑 王晔)