

## 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型

唐学军<sup>1</sup>, 韩 佶<sup>2</sup>, 苗世洪<sup>2</sup>, 杨东俊<sup>1</sup>, 张雅薇<sup>1</sup>

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 风电的随机波动性影响了电力系统经济运行。为充分挖掘需求侧响应资源, 需要考虑不同负荷对电价响应的差异性, 并将其融入传统调度中。首先, 基于电价弹性矩阵, 对用户的电价响应行为建模。其次, 分析不同负荷的电价响应特性, 对负荷进行分类。在此基础上, 基于峰谷分时电价, 以系统运行经济性为目标, 考虑用户满意度约束, 建立多类型负荷协调控制模型。并将模型转化为一个双层优化问题, 利用差分进化粒子群算法进行求解。最后, 在一10机系统中进行仿真验证。结果表明, 所建立的多类型负荷协调控制模型可充分挖掘不同负荷的需求响应能力, 能有效降低发电成本, 有利于系统经济运行。

**关键词:** 多类型; 需求响应; 控制模型; 优化调度; 峰谷分时电价; 电价弹性矩阵

### Coordinated control model of multi-type load based on demand response

TANG Xuejun<sup>1</sup>, HAN Ji<sup>2</sup>, MIAO Shihong<sup>2</sup>, YANG Dongjun<sup>1</sup>, ZHANG Yawei<sup>1</sup>

(1. Economic Institute of Technology, Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The stochastic fluctuations of wind influence economic operation of power system. We need to consider the differences of different load response to electricity prices in order to tap demand response resource fully, and blend it in the traditional scheduling. Firstly, based on price-elasticity matrix, this paper establishes the behaviour of the load response to price. Secondly, it analyses electricity price response characteristics of different loads, and classifies the load. Based on TOU price, it establishes coordinated control model of multi-type load. This model regards the cost of consumed energy as the objective, and takes satisfaction of the electricity load behaviour into consideration. The model can be converted into a double optimization problem, and the hybrid algorithms about differential evolution and particle swarm optimization are used to solve this problem. Lastly, its good performance is tested using a ten-unit system after simulation, the result shows that the model can tap demand response resource fully, reduce the cost of power generation and be good for operation of system in an economic and safe mode.

**Key words:** multi-type; demand response; control model; optimal operation; time-of-use price; price elasticity matrix

## 0 引言

随着社会与经济的快速发展, 人类对电能的需求量越来越大, 这也增大了人们对化石能源的需求。但是, 传统的化石能源可探明储量有限, 将在百年之后消耗殆尽<sup>[1]</sup>; 除此之外, 化石能源污染环境, 严重危害人体健康<sup>[2]</sup>。为应对上述问题, 近年来中国大力发展风力发电, 截至2013年底, 我国风电并网容量居世界第一位<sup>[3]</sup>。但随着风电装机容量的不断加大, 其具有的波动性和间歇性给电力系统的经

济运行带来了巨大挑战。为提高含风力发电的电力系统运行经济性, 国内外学者进行了大量的研究<sup>[4-7]</sup>。文献[8]基于风电预测误差随时间尺度缩短而减小的特点, 以系统供电可靠性为基本前提, 提出了多级机组组合策略, 该策略有效降低了发电成本; 文献[9-10]提出了大规模风电并网时的随机机组组合模型, 并采用随机规划的方法进行求解, 与确定机组组合模型相比, 该模型有效降低了发电成本; 文献[11-12]基于机会约束规划理论, 以概率的形式描述相关约束条件, 建立了含风电场机组组合模型,

并把组合问题分为内外两层优化子问题求解; 文献[13-15]考虑机组组合对环境污染造成的负面影响, 建立了多目标机组组合模型, 并通过对目标函数的模糊化处理对模型进行求解。

以上文献仅仅考虑通过常规机组的协调优化以实现风电的全额并网, 但是常规机组调节能力有限, 随着风电装机容量的增加, 单独通过常规机组的协调不仅很难实现风电的全额并网, 而且经济性欠佳。文献[16-18]指出, 用户侧可以参与主能量市场和辅助服务市场。通过合理的电价激励, 协调用户有序用电, 并使其与传统机组共同配合, 是解决大规模风电并网的有效途径, 极大提高了系统运行的经济性。文献[19]考虑电网调度中网络安全约束和需求响应满意度约束, 建立柔性负荷实时调度模型, 保证实时调度中电网的安全运行; 文献[20]将可中断负荷作为部分系统备用, 建立面向大容量风电接入系统的日前调度模型和运行模拟模型, 该模型可有效降低发电成本, 提高风电利用效率; 文献[21-22]基于风电在不同时间尺度误差的不同以及电网对应调节能力的差异, 提出“多级协调、逐级细化”的多时间尺度协调的柔性负荷响应调度模型与策略; 文献[23-24]综合考虑多方面影响, 建立了多目标负荷调度模型, 并采用隶属度函数对模型进行求解。

但是, 现有对需求侧响应建模的研究中, 鲜有考虑不同需求侧资源对电价响应的差异性。因此, 为充分挖掘需求侧响应资源, 本文基于峰谷分时电价, 充分考虑不同负荷对电价响应的差异性, 制定针对不同负荷的需求响应措施, 以此提高电力系统运行经济性。

## 1 价格型负荷响应行为建模

为描述用户对电价的响应行为, 本文采用电量电价弹性矩阵对价格型负荷的响应行为建模。文献[25]较全面地阐述了电量电价弹性矩阵的相关理论, 本文仅阐述一些重要概念。

### 1.1 弹性系数

根据经济学原理, 电量电价弹性可以反映电量需求变化与电价变化之间的关系。电量电价弹性的定义是用电量变化率与相应负荷的价格变化率之比, 表达式为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon$  为电量电价弹性系数;  $p$ 、 $\Delta p$  分别是电价和电价的变化量;  $L$ 、 $\Delta L$  分别是电量和电量的改变量。

电量电价弹性系数分为自弹性系数和交叉弹性系数, 分别表示用户对当前时段电价和其他时段电价的响应。其表达式分别如式(2)和式(3)所示。

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta L_i}{L_i} \left( \frac{\Delta p_i}{p_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta L_i}{L_i} \left( \frac{\Delta p_j}{p_j} \right)^{-1} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_{ii}$  为自弹性系数;  $\varepsilon_{ij}$  为交叉弹性系数;  $L_i$  与  $\Delta L_i$  分别表示时段  $i$  的用电量和变化量;  $p_i$ 、 $p_j$  与  $\Delta p_i$ 、 $\Delta p_j$  分别表示时段  $i$ 、 $j$  的电价和电价的变化量。

### 1.2 用户电价响应行为建模

对于  $n$  时段的用户对电价响应行为建模为

$$E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \cdots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $n$  为时段数。

根据电量电价弹性矩阵可以计算当电价发生变化时用户用电量变化率为

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta L_1}{L_1} \\ \frac{\Delta L_2}{L_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta L_n}{L_n} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta p_1}{p_1} \\ \frac{\Delta p_2}{p_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta p_n}{p_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 2 基于电价响应特性的负荷分类

不同行业的用电特性以及对电价的响应特性不尽相同, 在典型的配电网中, 大工业用电、商业用电和居民用电是构成需求响应的主体部分。在需求响应调度中, 只有准确把握这几个行业的响应特性, 才能制定针对某一类负荷相应的需求响应措施。

### 2.1 大工业用电分析

大工业是国家最大的电力消耗行业, 这类用户数量相对较少, 但用电需求大, 电费支出一般占生产总成本的 50% 以上。其中, 钢铁、建材等行业负荷率高, 负荷曲线波动小, 设备运转周期长, 对峰谷分时电价响应比较积极, 低谷、平时段负荷用电量增大, 高峰时段负荷用电量减小, 本文将这类负荷称为极柔负荷。冶金、化工等行业由于生产周期比较长, 生产方式不易调整, 且国家政策对该类用

户的生产安排的一系列规定, 导致企业无法实现错峰生产, 其对电价的响应程度不如极柔负荷, 本文将将其称为较柔负荷。

## 2.2 商业用电分析

商业用户种类丰富, 包括大型商场、宾馆、餐饮、娱乐、洗浴、学校、写字楼、医院、办公楼等等<sup>[26]</sup>。这些行业的用电差异性不大, 一部分原因在于改变商业用户用电方式的驱动力主要源于经济因素, 另一部分原因在于商业负荷种类较少, 包括: 空调、照明、电梯、热水器、电脑等。其中, 照明、电梯、热水器、电脑等设备对电价和激励的响应能力十分有限, 中央储能空调是参与需求响应最重要的部分。文献<sup>[27]</sup>指出, 商业用户对电价的响应敏感程度低于工业用电, 本文将将其称为较刚负荷。

## 2.3 居民用电分析

区别于大型工业用户和商业用户, 居民用户的需求响应行为具有其自身鲜明的特点。影响居民用户的需求响应行为的因素包括经济因素、意识因素、人口因素<sup>[28]</sup>。其中, 家庭的经济条件是影响居民用电响应的重要一点。对于经济条件较好的用户, 一般不会因电价的变化而调整自身的用电行为; 而对经济条件一般的用户则会把用电时间转移到谷电价时段。因此, 居民用户中包含极柔负荷、较柔负荷、较刚负荷。除此之外, 还有一类居民用电对电价的响应可以忽略不计, 本文将将其称为极刚负荷。

# 3 多类型负荷协调控制模型

## 3.1 数学模型

### 1) 目标函数

风电场建成后, 其发电运行时不需要消耗燃料, 在短期电力系统经济调度问题中, 一般不考虑风电的发电成本。因此, 本文建立的多类型负荷协调控制模型, 其目标函数包括常规火电机组启停成本和发电成本。机组的启停成本分为冷启动成本和热启动成本<sup>[29]</sup>; 机组的发电成本采用二次函数的形式。

$$\min F = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{i,t} \cdot f(P_{G,i,t}) + S_{i,t} \cdot (1 - u_{i,t-1}) \cdot u_{i,t}] \right\} \quad (6)$$

$$f(P_{G,i,t}) = a_i \cdot (P_{G,i,t})^2 + b_i \cdot P_{G,i,t} + c_i \quad (7)$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} S_{\text{hot},i} & (T_{\text{minstop},i} \leq T_{\text{off},i,t} \leq T_{\text{minstop},i} + T_{\text{cold},i}) \\ S_{\text{cold},i} & (T_{\text{off},i,t} \geq T_{\text{minstop},i} + T_{\text{cold},i}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T$  为调度周期;  $N$  为常规机组数目;  $u_{i,j}$  为常规机组  $i$  在时段  $t$  的启停状态,  $f(P_{G,i,t})$  为常规机组燃料成本;  $P_{G,i,t}$  为常规机组  $i$  在时段  $t$  的平均出

力;  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  为常规机组燃料特性系数;  $S_{i,t}$  为常规机组  $i$  在时段  $t$  的启停成本;  $S_{\text{hot},i}$  和  $S_{\text{cold},i}$  分别为常规机组  $i$  的热启动和冷启动费用;  $T_{\text{minstop},i}$  为常规机组  $i$  的最小停机时间;  $T_{\text{off},i,t}$  为常规机组  $i$  在时段  $t$  连续停机的时段数;  $T_{\text{cold},i}$  为常规机组  $i$  的冷启动时间。

### 2) 约束条件

#### (1) 功率平衡条件

$$\sum_{i=1}^N P_{G,i,t} + P_{W,t} = \sum_{j=1}^M P_{\text{load},j,t} \quad (9)$$

式中:  $P_{W,t}$  为时段  $t$  风电机组出力;  $P_{\text{load},j,t}$  为时段  $t$  第  $j$  类负荷的负荷大小。

#### (2) 常规机组输出功率约束

$$P_{\text{min},i} \leq P_{G,i,t} \leq P_{\text{max},i} \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{min},i}$  和  $P_{\text{max},i}$  为常规机组  $i$  的最小和最大输出功率。

#### (3) 常规机组爬坡率约束

$$-DR_i \leq P_{G,i,t} - P_{G,i,t-1} \leq UR_i \quad (11)$$

式中,  $DR_i$  和  $UR_i$  分别是常规机组  $i$  的下坡爬坡率和上坡爬坡率。

#### (4) 常规机组最小运行和停运时间约束

$$u_{i,t} = \begin{cases} 1 & T_{i,\text{on}} < T_{i,\text{on},\text{min}} \\ 0 & T_{i,\text{off}} < T_{i,\text{off},\text{min}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $T_{i,\text{off}}$  为常规机组  $i$  在时段  $t-1$  连续停机的时段数;  $T_{i,\text{on}}$  为常规机组  $i$  在时段  $t-1$  连续运行的时段数;  $T_{i,\text{on},\text{min}}$  和  $T_{i,\text{off},\text{min}}$  分别为机组  $i$  的最小运行时间和最小停运时间。

#### (5) 备用容量约束

对于系统的正旋转备用约束, 本文考虑风电出力最小时所需要的正旋转备用为

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{\text{max},i} + \underline{P}_{W,t} \geq (1 + L\%) \sum_{j=1}^M P_{\text{load},j,t} \quad (13)$$

对于系统的负旋转备用约束, 本文考虑风电出力最大时所需要的负旋转备用为

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{\text{min},i} + \overline{P}_{W,t} \leq (1 - L\%) \sum_{j=1}^M P_{\text{load},j,t} \quad (14)$$

式中:  $L\%$  为针对系统负荷的旋转备用率;  $\overline{P}_{W,t}$  和  $\underline{P}_{W,t}$  分别为第  $t$  时段风电出力的上下限。

#### (6) 用户满意度约束

实施峰谷分时电价后, 用户必将改变原有的用电方式, 这将导致用户的用电满意度下降。定义用户用电方式的满意度  $\eta_k$  为某时段负荷改变量与未

实施峰谷分时电价原始负荷的比值:

$$\eta_k = 1 - \frac{\sum_{j \in T} |L_{pj,k}^{(0)} - L_{pj,k}|}{\sum_{j \in T} L_{pj,k}^{(0)}} \geq \eta_{k,\min} \quad (15)$$

### 3.2 求解流程

模型求解流程如图 1 所示。该模型为一协调控制模型, 可将其转化为一个双层优化问题, 外层为用电侧峰谷分时电价的优化, 内层为常规机组启停状态和出力的优化。该模型通过对各类负荷的峰谷电价进行寻优, 以达到引导用户合理有序用电的协调控制作用。本文采用差分进化粒子群混合算法 (DEPSO) 分别对内、外层优化问题进行求解。首先, 随机初始化 4 类负荷峰谷电价拉开比, 计算 4 类负荷的峰谷分时电价, 并根据电价弹性矩阵计算峰谷分时电价后的负荷; 之后利用差分进化粒子群算法求解出每一时段的机组启停状态和机组出力, 并求出总的机组启停成本和发电成本之和, 记为  $F$ 。之后根据差分进化粒子群算法不断更新峰谷电价比, 并计算每次更新峰谷电价比后的  $F$ , 选取  $F$  最小所对应的情形作为最优峰谷分时电价和机组组合方案。

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数

算例选取 10 机系统, 结合某地区 24 h 原始负荷以及风电数据求解机组组合方案。目前, 电力负荷一般按照大工业、一般工商业、居民 3 类用户分别实行不同的峰谷分时电价, 各类用户具有不同的电价响应特性。从前面的分析可知, 大工业负荷包括极柔负荷和较柔负荷, 其中极柔负荷占整个工业负荷的 70%; 商业负荷对电价响应特性相似, 一般为较刚负荷; 居民负荷的电价响应特性较为复杂, 本文通过将居民用户整合得到其弹性系数。4 类负荷的原始电价数据和典型自弹性系数如表 1 所示。实际情况中, 电价弹性具有延时特性, 即用户对电价的响应总是在实施峰谷分时电价若干时间以后才得以体现, 所以本文的弹性系数为各类用户实施峰谷分时电价后一段时间的稳定值。

表 1 原始电价数据和典型自弹性系数

Table 1 Original price data and the typical elasticity coefficient

负荷种类	自弹性系数	交叉弹性系数			原始电价/ (元/kWh)
		峰-平	峰-谷	平-谷	
大工业(极柔)	-0.38	0.03	0.30	0.03	0.63
大工业(较柔)	-0.20	0.02	0.08	0.02	0.63
商业	-0.12	0.02	0.02	0.02	0.97
居民	-0.05	0.02	0.04	0.02	0.56

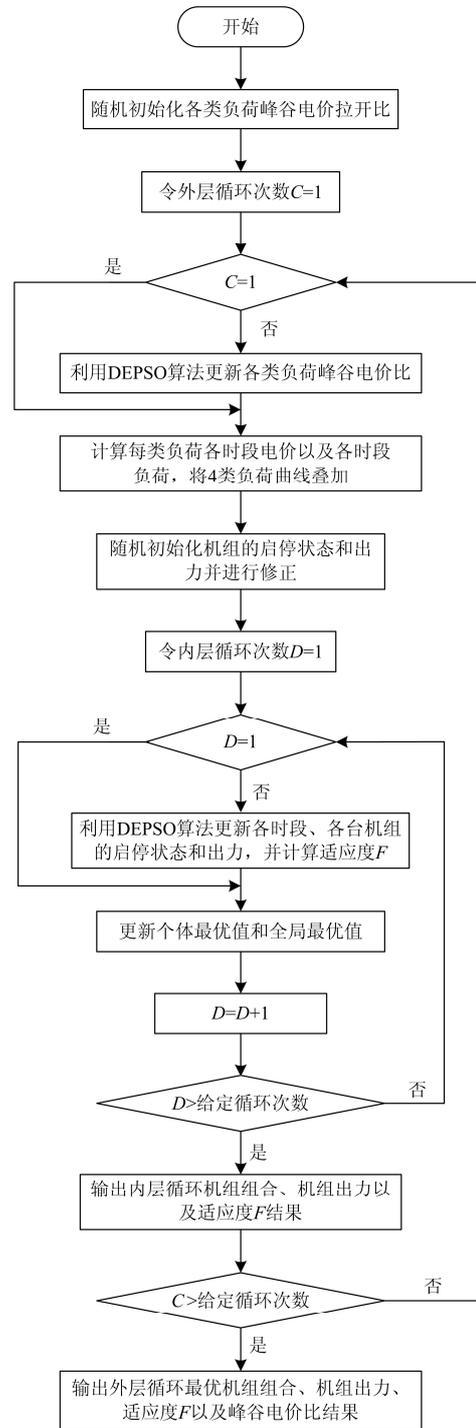


图 1 模型求解流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of the model

### 4.2 求解结果

为了充分说明本文考虑用户种类对电力系统经济运行的积极影响, 定义 3 种定价模式如表 2 所示。其中: 模式 1 对几类负荷实施原始电价, 用户的用电行为将不会改变; 模式 2 依据实施峰谷分时电价前的总负荷曲线划分峰平谷时段, 并为几类负荷制

定相同的峰谷分时电价策略，即制定相同的峰谷电价比；模式3为本文的多类型负荷协调控制模式，即根据几类负荷的负荷曲线分别为其划分峰平谷时段，并根据负荷特性制定差异性的峰谷分时电价。模式2和模式3的峰平谷时段划分结果如表3所示。

表2 模式定义

Table 2 Definition of different modes

模式	定义
1	只考虑发电侧资源
2	几种负荷采用相同的峰谷电价比
3	多类型负荷协调控制模式(本文模式)

表3 峰平谷时段划分结果

Table 3 Periods of TOU

模式	负荷种类	峰时段	平时段	谷时段
2	大工业+商业+居民	10-21	7-9,22-24	1-6
	大工业	10-17	8-9,18-20	1-7,21-24
3	商业	14-21	10-13,22-24	1-9
	居民	11-12,17-22	6-10,13-16,23-24	1-5

通过求解模型，得到模式2和模式3的最优峰谷分时电价方案如表4和表5所示，3种模式的总负荷曲线如图2所示。从图2可以看出，与模式1相比，模式2和模式3由于实施了峰谷分时电价，形成了发电资源和负荷资源共同协调配合风电并网的新模式，均具有较好的削峰填谷效果。其中模式2为4种负荷制定相同的电价策略，与模式1相比有效降低了峰谷差，但是大工业的用电满意度降低，其用电行为受到了严重影响，很难保证企业的生产计划正常进行；相反，商业负荷和居民负荷由于对电价响应相对不够敏感，太低的峰谷电价比使得其需求响应资源未得到充分挖掘。

从表5可以看出，模式3中大工业用户的峰谷电价比低于商业用户和居民用户，这是由于大工业负荷对电价的响应敏感程度高于另外两种负荷，大

表4 模式2的最优峰谷分时电价方案

Table 4 Optimal TOU of mode 2

负荷种类	峰电价/(元/kWh)	平电价/(元/kWh)	谷电价/(元/kWh)	峰谷电价比	用户满意度/%
大工业(极柔)	0.88	0.63	0.38	2.3	84.1
大工业(较柔)	0.88	0.63	0.38	2.3	86.7
商业	1.35	0.97	0.59	2.3	92.2
居民	0.78	0.56	0.34	2.3	90.1

表5 模式3的最优峰谷分时电价方案

Table 5 Optimal TOU of mode 3

负荷种类	峰电价/(元/kWh)	平电价/(元/kWh)	谷电价/(元/kWh)	峰谷电价比	用户满意度/%
大工业(极柔)	0.86	0.63	0.41	2.1	88.3
大工业(较柔)	0.86	0.63	0.41	2.1	89.4
商业	1.61	0.97	0.33	4.8	89.7
居民	0.85	0.56	0.27	3.2	89.2

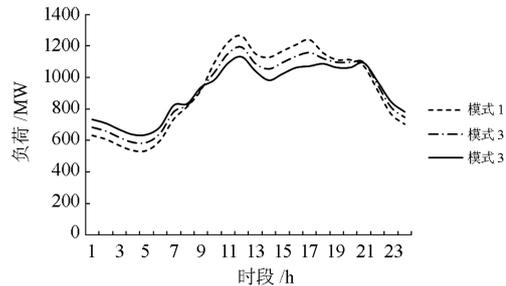


图2 3种模式下的负荷曲线

Fig. 2 Load curve of three mode

的峰谷电价比将会严重影响用户的正常用电，降低用户满意度，使得峰谷分时电价政策难以推行。商业用户和居民用户由于自弹性系数和交叉弹性系数均较小，对电价响应相对不敏感，适当地增大峰谷电价比，将引导用户合理有序地用电，对电力系统的经济运行、减小峰谷差、提高电力系统负荷率起到积极作用。3种模式下的负荷对比情况如表6所示。

表6 不同模式下的负荷对比

Table 6 Comparison of load in different modes

	峰负荷/MW	谷负荷/MW	峰谷差/MW	负荷率/%
模式1	1264	536	728	73.43
模式2	1193	588	605	77.38
模式3	1131	637	494	80.91

表7显示了3种模式下的火电机组发电成本。模式2和模式3的发电成本和启动成本与模式1相比均有所下降，这是因为峰谷分时电价的引入，减小了负荷曲线的峰谷差，提高了负荷率，减少了发电机组的启停次数，减轻了发电机组的调峰负担。但由于模式2忽略了不同负荷响应电价的差异性，采用统一的定价模式(相同的峰谷电价比)，商业和居民负荷的需求响应资源未得到充分调动，增加了火电机组的调节负担，其发电总成本高于模式3的发电总成本。

表 7 成本对比

Table 7 Comparison of cost

	发电成本/元	启动成本/元	总成本/元
模式 1	3 675 956	24 409	3 700 365
模式 2	3 608 775	24 133	3 632 908
模式 3	3 571 382	18 232	3 589 614

图 3—图 5 显示了 3 种模式下的火电机组出力情况,其中机组 1 至机组 10 按照机组容量大小排序。可以得出结论:模式 3 更多地利用大型发电机组进行功率不平衡的调节,减少了小型发电机组的利用率,对降低单位发电量煤耗和污染物排放量起到积极作用。

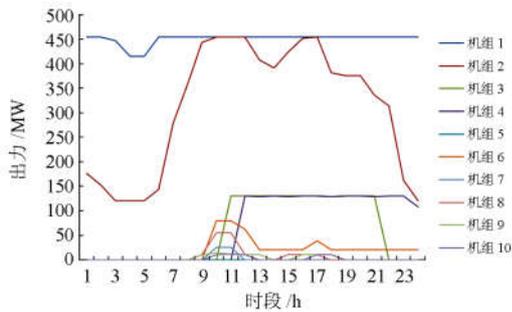


图 3 模式 1 的机组出力

Fig. 3 Unit output of mode 1

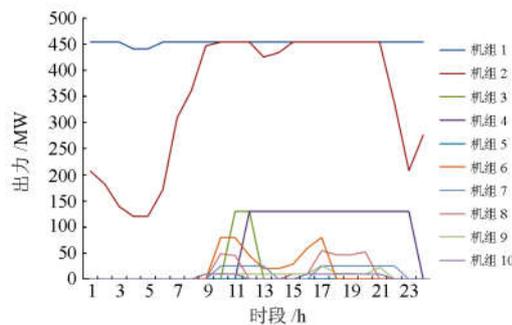


图 4 模式 2 的机组出力

Fig. 4 Unit output of mode 2

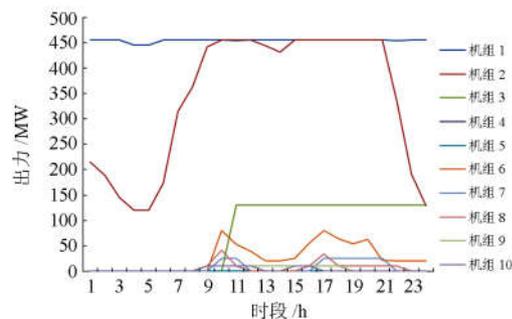


图 5 模式 3 的机组出力

Fig. 5 Unit output of mode 3

## 5 结论

研究了电量电价弹性矩阵模型,分析了在峰谷分时电价环境下大工业、商业和居民负荷对电价响应的差异性,并在此基础上对负荷进行了分类。考虑需求侧响应对发电调度和峰谷分时电价对负荷响应量的影响,建立了一种计及用户侧互动的多类型负荷协调控制模型。算例仿真结果表明,所建立的模型可充分挖掘不同负荷的响应能力,能有效降低发电成本,减轻环境污染,提高系统的经济运行水平。

## 参考文献

- [1] 李虹,董亮,段红霞. 中国可再生能源发展综合评价与结构优化研究[J]. 资料科学, 2011, 33(3): 431-433.  
LI Hong, DONG Liang, DUAN Hongxia. On comprehensive evaluation and optimization of renewable energy development in China[J]. Resources Science, 2011, 33(3): 431-433.
- [2] 何庆成,李霞. 气候变化:过去、现在和将来——第 33 届国际地质大会气候变化专题综述[J]. 水文地质工程地质, 2009(2): 136-140.  
HE Qingcheng, LI Xia. Climate change: past, present and future - the 33rd international geological congress project review of climate change[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009(2): 136-140.
- [3] 别朝红,胡国伟,谢海鹏,等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.  
BIE Chaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Wind power system optimal operation considering the response demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [4] 孙欣,方陈,沈风,等. 考虑风电出力不确定性的发用电机组组合方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 204-211.  
SUN Xin, FANG Chen, SHEN Feng, et al. An integrated generation-consumption unit commitment model considering the uncertainty of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 204-211.
- [5] 施涛,高山,张宁宇. 含风电场的机组组合二阶段随机模型及其改进算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 172-180.  
SHI Tao, GAO Shan, ZHANG Ningyu. Two-stage stochastic model of unit commitment with wind farm and an improved algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 172-180.

- [6] 郭鹏, 文晶, 朱丹丹, 等. 基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 1-9.  
GUO Peng, WEN Jing, ZHU Dandan, et al. The coordination control strategy for large-scale wind power consumption based on source-load interactive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 1-9.
- [7] 张彬, 毛荀, 彭晓涛. 一种考虑风电出力及负荷不确定性的最优调峰方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 106-113.  
ZHANG Bin, MAO Xun, PENG Xiaotao. Study on an optimal method of peak-load regulation considering uncertainty of wind power output and load[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 106-113.
- [8] 张娜, 吕泉, 张显, 等. 含风电系统的多级机组组合协调制定策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.  
ZHANG Na, LÜ Quan, ZHANG Xian, et al. A multi-level unit commitment coordinated strategy for power system with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [9] TUOHY A, MEIBOM P, DENNY E, et al. Unit commitment for systems with significant wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 592-601.
- [10] 雷宇, 杨明, 韩学山. 基于场景分析的含风电系统机组组合的两阶段随机优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 58-67.  
LEI Yu, YANG Ming, HAN Xueshan. A two-stage stochastic optimization of unit commitment considering wind power based on scenario analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 58-67.
- [11] 张步涵, 邵剑, 吴小珊, 等. 基于场景树和机会约束规划的含风电场电力系统机组组合[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 127-135.  
ZHANG Buhuan, SHAO Jian, WU Xiaoshan, et al. Unit commitment with wind farms using scenario tree and chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 127-135.
- [12] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 129-137.  
JIANG Yuewen, CHEN Chong, WEN Buying. Particle swarm research of stochastic simulation for unit commitment in wind farms integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 129-137.
- [13] 张宁宇, 高山, 赵欣. 一种考虑风电随机性的机组组合模型及其算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 129-137.  
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. An unit commitment model and algorithm with randomness of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 129-137.
- [14] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.  
ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 71-76.
- [15] 张宁, 胡兆光, 周渝慧. 考虑需求侧低碳资源的新型模糊双目标机组组合模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 25-30.  
ZHANG Ning, HU Zhaoguang, ZHOU Yuhui. A new fuzzy unit combination model for double considering low carbon resources in demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 25-30.
- [16] KARANGELOS E, BOUFFARD F. Towards full integration of demand-side resources in joint forward energy/reserve electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 280-289.
- [17] LEI W. Impact of price based demand response on market clearing and locational marginal prices[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(10): 1087-1095.
- [18] VLACHOS A G, BISKAS P N. Demand response in a real-time balancing market clearing with pay-as-bid pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1966-1975.
- [19] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5571-5578.  
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand response considering security constraints to accommodate the wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5571-5578.
- [20] 王蓓蓓, 刘小聪, 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 35-44.  
WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44.

- [21] 杨胜春, 刘建涛, 闫建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.  
YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [22] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统 旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.  
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [23] 杨家然, 王兴成, 蒋程, 等. 计及风力发电风险的电力系统多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 25-31.  
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, JIANG Cheng, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling of power system considering wind power risk[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 25-31.
- [24] 康守亚, 李嘉龙, 李燕珊, 等. 考虑峰谷分时电价策略的源荷协调多目标发电调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 83-89.  
KANG Shouya, LI Jialong, LI Yanshan, et al. Multi-objective generation scheduling model of source and load considering the strategy of TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 83-89.
- [25] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫, 等. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19, 24.  
QIN Zhenfang, YUE Shunmin, YU Yixin, et al. Price elasticity matrix of demand in current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 16-19, 24.
- [26] 朱荏, 郑云鹏, 刘丙瑞, 等. 电价机制下商业用户用电响应行为分析[J]. 现代电力, 2012, 29(5): 77-80.  
ZHU Jiang, ZHENG Yunpeng, LIU Bingrui, et al. Analysis on commercial users' intelligent response behavior to Tariff mechanism[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(5): 77-80.
- [27] 孔祥玉, 杨群, 穆云飞, 等. 分时电价环境下用户负荷需求响应分析方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 27(10): 75-80.  
KONG Xiangyu, YANG Qun, MU Yunfei, et al. Analysis method for customers demand response in time of using price[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 75-80.
- [28] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3633.  
WANG Beibei. Research on consumers' response characteristic and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3633.
- [29] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 45-52.  
WU Xiaoshan, ZHANG Buhuan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 45-52.

收稿日期: 2016-08-14; 修回日期: 2017-03-06

作者简介:

唐学军(1965—), 男, 硕士, 高级经济师, 主要从事能源经济及电力市场的研究;

韩 喆(1993—), 男, 通信作者, 硕士, 主要从事需求侧响应及优化调度的研究; E-mail: han\_ji1993@163.com

苗世洪(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事主动配电网、电力系统保护与控制的研究。E-mail: shmiao@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)