

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.04.010

考虑尖峰电价的节能减排机组组合

张晓花^{1,2}, 朱陈松³, 张嘉伟⁴, 朱正伟⁵

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州 213164; 3. 常州大学 商学院, 江苏 常州 213164; 4. 中海油能源发展装备技术有限公司 上海分公司, 上海 200335; 5. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:基于尖峰电价机制,引入动态需求价格弹性并分析动态线性价格需求响应,建立了基于尖峰电价并考虑节能减排的机组组合模型,目标函数中加入削减负荷的补偿成本。仿真结果表明,尖峰电价作为考虑需求响应的一种灵活定价机制,能优化机组的启停及出力,还能通过优化价格波动引导需求侧的用电行为和负荷曲线,将高峰时段的部分负荷直接削减,并给予削减负荷一定的补偿,有效地削减了负荷的峰谷差。并综合考虑了节能减排的协调,是协调供需双方在达到供需平衡基础上提高系统节能减排能力的一种有效方式。

关键词:尖峰电价;节能减排;负荷削减;机组组合

中图分类号:TM 714

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2019)04-0070-06

Cost-Emission Unit Commitment Considering Critical Peak Pricing

ZHANG Xiaohua^{1,2}, ZHU Chensong³, ZHANG Jiawei⁴, ZHU Zhengwei⁵

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 3. Business College, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 4. China National Offshore Oil Corporation Energy Technology Equipment Technology Company Limited Shanghai Branch, Shanghai 200335, China; 5. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Critical peak pricing with dynamic elasticity of demand is implemented, and the cost-emission unit commitment model based on critical peak pricing is proposed. Demand cutting cost is introduced in the objective function. Finally, simulation is implemented and the results show the effectiveness of the proposed module. The critical peak pricing as a flexible pricing mechanism can optimize the units status and output. It can also guide the demand side electricity consumption behavior and

收稿日期:2018-12-06。

基金项目:江苏省社会科学基金项目(18GLB016);江苏省科技支撑计划(工业)重点项目(BE-2013005-3)。

作者简介:张晓花(1981—),女,山西五台人,博士,讲师。E-mail: xhzhazhangcz@cczu.edu.cn

引用本文:张晓花,朱陈松,张嘉伟,等. 考虑尖峰电价的节能减排机组组合[J]. 常州大学学报(自然科学版),2019,31(4):70-75.

load curve by optimizing price fluctuation. The penk-valley load can be effectinely reduced by reducing part of the load during the peak period and compensating the load reduction to a certain extent. Considering the coordination of energy and emission, it is an effective way to improve the energy saving and emission reduction of the system based on the balance between supply and demand.

Key words: critical peak price; cost-emission; peak load cutting; unit commitment

需求响应是一种用户侧响应价格信号或激励机制选择在非峰时段用电的行为,是电力市场中十分关键的一个环节。根据不同的反应方式,需求响应可分为基于激励和基于价格的需求响应两大类^[1];基于价格的需求响应分为分时电价(Time of Use, TOU)、实时电价(Real-time price, RTP)和尖峰电价(Critical-peak pricing, CPP) 3种模式^[2-3]。

在基于价格的需求响应中目前使用最多的是基于 TOU 的模式,通过调节电价引导用户用电。刘小聪等在智能电网框架下建立了一种融入 TOU 和可中断负荷对负荷曲线优化的发电调度模型^[4]。Bartusch 分析了基于 TOU 的居民侧需求响应在电力分配中的作用^[5]。TOU 的时段划分和费率都是事先确定的,当系统出现短期容量短缺时,TOU 不能给予用户进一步削减负荷的激励,因此效果并不理想。TOU 对周期性尖峰负荷的削减作用有限。RTP 是理想的动态电价机制,但变化频繁且对调度通信设备和技术要求较高,全面实施有一定难度。Roscoe 和 Conejo 开展了基于 RTP 的优化研究,并考虑了电价的不确定性^[6-7]。另一种电价机制 CPP, CPP 方法是在 RTP 和 TOU 基础上的一种动态定价机制,尽管 CPP 不如 RTP 高效经济,但 CPP 降低了 RTP 中潜在的价格风险,同时比 TOU 更为经济高效,可以有效降低尖峰时段负荷,较好的实现了 TOU 和 RTP 的折衷。CPP 削减尖峰负荷的作用显著,统计数据表明,从工商用户到居民用户, CPP 均达到较好的效果^[8-9]。高赐威等通过确定尖峰日,利用 CPP 作用机理模型量度用户对 CPP 的响应^[10],但没有考虑需求价格弹性的影响;李扬等在给定的尖峰时段和 CPP 下,通过固定值的需求价格弹性分析了考虑需求响应的 CPP 实施效益^[11];王秀丽等建立了综合考虑各方利益的多目标变时段尖峰电价决策模型,需求价格弹性是当作固定值来考虑^[12];Aghaei 等介绍了考虑动态需求价格弹性的 CPP 模式,采用了需求函数来刻画转移负荷的多少^[13]。

目前基于价格的需求响应大多采用固定值的需求价格弹性来分析用户的响应行为,基于尖峰电价的机组组合的研究也较少。基于此本文研究基于动态价格弹性的尖峰电价机组组合,采用需求函数来表示负荷的削减,综合考虑系统的节能与减排,引入尖峰电价引导用户优化用电行为,实现节能减排。

1 需求价格弹性

需求价格弹性简称为需求弹性,它是需求量对商品自身价格变动的反应程度, t 时刻的电力需求弹性 E^t 定义为

$$E^t = \frac{\Delta D^t}{D_0^t} / \frac{\Delta Pr^t}{Pr_0^t} = \frac{\Delta D^t}{\Delta Pr^t} \cdot \frac{Pr_0^t}{D_0^t} \quad (1)$$

式中: ΔPr^t 为 t 时刻电价变化量; Pr^t, Pr_0^t 为 t 时刻的实际电价与初始电价; ΔD^t 为 t 时刻负荷变动量; D_0^t 为 t 时刻的初始负荷。根据需求价格法则,需求量和价格反向变动,所以 E^t 一般为负值。根据式(1) ΔD^t 可表示为

$$\Delta D^t = \frac{D_0^t \cdot \Delta Pr^t \cdot E^t}{Pr_0^t} \quad (2)$$

需求和价格的关系有 4 种不同模型,分别为线性型、指数型、二次型、对数型。本文采用动态需求弹性,并选用线性的需求价格模型,实际负荷可表示为

$$D^t = a_{lin} + b_{lin} \cdot Pr^t \quad (3)$$

式中: D^t 为 t 时刻的实际负荷; $a_{\text{lin}}, b_{\text{lin}}$ 为线性需求价格关系系数。

根据式(1),进一步得到线性的动态需求弹性为

$$E^t = b_{\text{lin}} \cdot \frac{Pr_0^t}{a_{\text{lin}} + b_{\text{lin}} \cdot Pr_0^t} \quad (4)$$

相应的,由式(2)、式(4)可得出需求函数

$$\Delta D^t = \frac{b_{\text{lin}} \cdot D_0^t}{a_{\text{lin}} + b_{\text{lin}} \cdot Pr_0^t} \cdot \Delta Pr^t \quad (5)$$

本文就采用式(5)所示的需求函数。

2 考虑尖峰电价的系统节能减排模型建立

2.1 节能减排模型的建立

火电机组 i 在 t 时刻的燃料费用表示为机组出力的二次函数

$$FC_i(p_i^t) = a_i + b_i p_i^t + c_i (p_i^t)^2 \quad (6)$$

整个调度时段内削减负荷的补偿成本为

$$F_{\text{DR}} = \sum_{t=1}^T (Pr^t - Pr_0^t) \cdot \Delta D^t \quad (7)$$

式中: T 为系统调度时段数; p_i^t 为机组 i 在 t 时刻的有功出力。 a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 的耗量特性参数。

相应的碳排放量表示为机组出力的二次函数形式

$$E_i(p_i^t) = (\alpha_i + \beta_i p_i^t + \gamma_i (p_i^t)^2) u_i^t \quad (8)$$

式中: $E_i(p_i^t)$ 为火电机组 i 在 t 时段下 CO_2 排放量; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为火电机组 i 的 CO_2 排放函数系数; u_i^t 为火电机组 i 在 t 时刻的开停机状态。

文中节能目标包括发电机组的运行成本(包含燃料费用和启停成本)及削减尖峰负荷补偿成本两部分,整个调度周期内节能减排总目标表示为:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [W_c ((a_i + b_i p_i^t + c_i (p_i^t)^2) u_i^t + S_i^t u_i^t (1 - u_i^{t-1})) + W_e \varphi_i (\alpha_i + \beta_i p_i^t + \gamma_i (p_i^t)^2) u_i^t] +$$

$$W_c \sum_{t=1}^T (Pr^t - Pr_0^t) \cdot \Delta D^t \quad (9)$$

$$\varphi_i = FC_i(p_i^{\max}) / E_i(p_i^{\max}) \quad (10)$$

并满足 $W_c + W_e = 1$ 。

式(9)中: F 为系统考虑节能减排的总成本; S_i^t 火电机组 i 在 t 时刻的启动成本; N 为火电机组数; φ_i 为火电机组 i 的污染气体排放惩罚系数^[14]。

2.2 约束条件

1)有功功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N p_i^t = D^t \quad (11)$$

$$D^t = D_0^t - \Delta D^t \quad (12)$$

2)负荷削减约束

削减负荷可表示为

$$\min \Delta D^t = \frac{b_{\text{lin}} \cdot D_0^t}{a_{\text{lin}} + b_{\text{lin}} \cdot Pr_0^t} \cdot (Pr_0^t - Pr^t) \quad (13)$$

尖峰电价可以有效降低系统在尖峰时段的负荷,此时削减负荷的限制为

$$0 \leq \Delta D^t \leq L \cdot D_0^t \cdot M \quad (14)$$

其中 M 和 L 分别定义为:

$$M = \frac{Pr_0^t - \min Pr_0^t}{\max Pr_0^t}, L = \frac{R_{\max}}{M_{\max}}$$

式中: M 和 L 为负荷偏移的下限系数, M 保证了负荷削减只发生在电价高于初始电价时, L 保证了负荷削减的最大值不变; R_{\max} 是削减负荷的最大值; M_{\max} 为最大的负荷偏移系数。

3)火电机组出力约束

$$p_{i\min} \leq p_i^t \leq p_{i\max} \quad (15)$$

式中 $p_{i\min}, p_{i\max}$ 分别为火电机组 i 有功出力的上下限。

4)火电机组最小启停时间约束

$$\begin{cases} 0 < M_{GTi} X_i^t \leq X_i^t \\ -X_i^t \leq M_{DTi} X_i^t < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: X_i^t 为机组 i 到 t 时刻连续运行(X_i^t 为正值)或连续停机(X_i^t 为负值)的时段数; M_{GTi}, M_{DTi} 分别为机组 i 的最小运行时间与最小停机时间。

5)系统旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N p_i^t + R^t \leq \sum_{i=1}^N p_{i\max} \quad (17)$$

式中 R^t 为 t 时刻系统的旋转备用。

3 算例仿真

本文以 10 机系统^[15]为例进行仿真分析,取系统的旋转备用容量为系统总容量的 10%, $a_{lin} = 1400, b_{lin} = -8.6$ ^[13],尖峰时段为(8~15 时段)和(18~22 时段),采用 CPLEX 软件来进行仿真优化。负荷削减的上限设为总负荷的 9%。系统的初始电价根据边际电价理论确定,当节能与减排对应权重分别为(1,0)时,即只考虑节能目标未考虑减排目标,由需求函数求得实际电价,各时段电价如图 1 所示;当节能与减排权重为(0.8,0.2)时,各时段电价如图 2 所示。

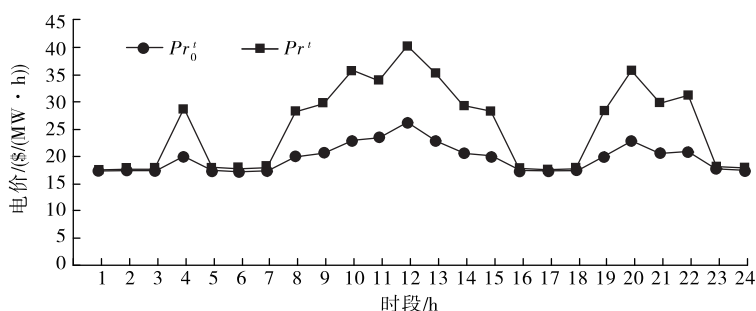


图1 节能减排权重为(1,0)时各时段初始电价与实际电价

从图 1 和图 2 中可以看出节能减排权重为(1,0)和(0.8,0.2)时,考虑尖峰电价的实际电价的波动趋势与初始电价的波动趋势基本一致,在负荷低谷时段(1~3 时段)、(5~7 时段)、(16~18 时段)和(23~24 时段)的初始电价与考虑尖峰的实际电价的值基本一致;在 4 时段、(8~15 时段)和(19~22 时段)随着初始电价的向上波动实际电价进一步抬高,并且在 4 时段、(8~15 时段)和(19~22 时段)权重为(0.8,0.2)时实际电价抬高的幅度比权重为(1,0)时抬高的幅度大,以负荷最大的时段 12 为例,权重为(1,0)时实际电价为 40.2 \$/MW,权重为(0.8,0.2)时为 44.58 \$/MW。

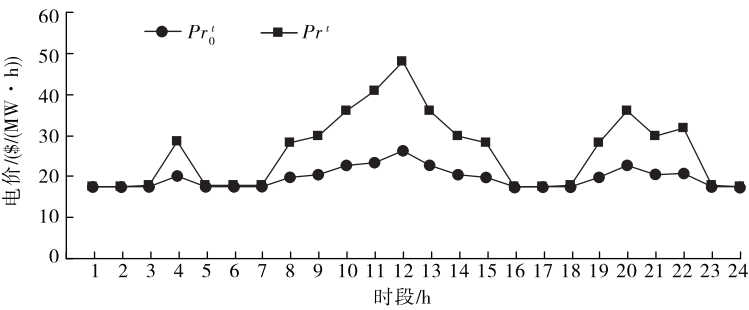


图2 节能减排权重为(0.8,0.2)时各时段初始电价与实际电价

从表1、表2中可以看出,考虑尖峰电价后,负荷峰谷差由原来的800 MW减少到了599.5 MW,减少了200.5 MW,使得负荷曲线更趋于平稳。本文通过合理优化尖峰电价达到削峰填谷的目的,从而减少了系统对高费用、高排放机组的依赖,提高其节能减排的能力。4时段由于价格波动比较大,因此负荷也有较大幅度的削减。

表1 节能减排权重为(1,0)时各时段削减的负荷

| 时段/h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|----|------|-------|-----|
| 削减负荷/MW | 0 | 0 | 1.3 | 55.8 | 2.0 | 1.7 | 2.6 | 68.3 | 85 | 128 | 107.7 | 153 |
| 时段/h | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 削减负荷/MW | 123 | 80.1 | 68.3 | 1 | 0 | 1.7 | 68.3 | 128 | 85 | 79.1 | 2.23 | 1.1 |

表2 节能与减排权重(0.8,0.2)时各时段削减的负荷量

| 时段/h | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------|-------|------|------|------|-----|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 削减负荷/MW | 0 | 0 | 1.3 | 55.8 | 2.0 | 1.7 | 2.6 | 68.3 | 86.9 | 167.8 | 192.5 | 201.2 |
| 时段/h | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 削减负荷/MW | 167.8 | 86.9 | 68.3 | 1 | 0 | 1.7 | 68.3 | 167.8 | 86.9 | 85.4 | 2.23 | 1.1 |

表3、表4分别列出节能与碳排放的权重分别为(1,0),(0.9,0.1),(0.8,0.2),(0.7,0.3)和(0.6,0.4)等情形结果。由此可见,随着节能目标对应权重的减小,系统的总成本有所增加,且增加CO₂排放量目标所对应的权重,其排放量可得到较大大幅减少;在相同的(0.8,0.2)权重下,表4中节能目标值为560 935 \$,碳排放目标值为173 588 t,表3中节能目标值为565 277.3 \$,碳排放目标值为258 511.4 t,考虑尖峰电价的节能减排目标比不考虑尖峰电价情况下总成本减少了4 342.3 \$,碳排放量减少了84 923.4 t,说明考虑尖峰电价的优化调度能有效提高系统的节能减排能力。在其他权重下对表3、表4的节能减排目标进行对比,考虑尖峰电价的优化调度能大幅减少碳排放量。具体节能减排目标之间的协调,可依据决策者的意愿,选取合适的权重,取得满意的调度结果。

表3 不考虑尖峰电价的火电节能减排调度目标与权重的关系

| 权重 | (1,0) | (0.9,0.1) | (0.8,0.2) | (0.7,0.3) | (0.6,0.4) |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $F/\$$ | 562 877.7 | 565 223.5 | 565 277.3 | 566 047.7 | 567 142.2 |
| E_c/t | 269 906.4 | 258 751.2 | 258 511.4 | 256 140.5 | 254 110.0 |

表4 考虑尖峰电价的火电节能减排目标与权重的关系

| 权重 | (1,0) | (0.9,0.1) | (0.8,0.2) | (0.7,0.3) | (0.6,0.4) |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $F/\$$ | 550 289 | 560 140 | 560 935 | 563 218 | 565 217 |
| E_c/t | 262 395 | 175 922 | 173 588 | 169 314 | 160 629 |

4 结 论

就考虑尖峰电价的火电节能减排调度进行研究,并考虑其动态需求价格弹性,在负荷尖峰时段提高实际电价从而减少用户在尖峰时段的用电量,从而有效的削减了负荷峰谷差;综合考虑了系统的节能减排,随着节能目标对应权重的减小,CO₂排放量目标所对应的权重的增加,系统总成本有所增加,系统CO₂排放量可得到大幅减少。因此通过合理选取节能和碳排放目标的权重,可实现节能与减排之间的有效折衷。

参考文献:

- [1]US Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them, Report to the United States Congress[R/OL].(2006-02-05)[2018-01-25]. <http://eetd.lbl.gov>.
- [2]AGHAEI J, ALIZADEH M I. Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources; A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,18:64-72.
- [3]张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- [4]刘小聪,王蓓蓓,李扬,等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):30-38.
- [5]BARTUSCH C,ALVEHAG K.Further exploring the potential of residential demand response programs in electricity distribution[J].Applied Energy,2014,125:39-59.
- [6]ROSCOE A J, AULT G. Supporting high penetrations of renewable generation via implementation of real time electricity pricing and demand response[J].IET Renewable Power Generation, 2010,4(4):369-382.
- [7]CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time demand response model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010,1(3):236-242.
- [8]PIETTE M A,WATSON D,MOTEGI N,et al. Auto mated critical peak pricing field tests: program description and results[EB/OL].(2007-07-21)[2018-01-25].<http://drcc.lbl.gov/pubs/59351.pdf>.
- [9]HERTER K, WAYLAND S. Residential response to critical-peak pricing of electricity: California evidence[J]. Energy, 2010,35(4):1561-1567.
- [10]梁甜甜,王磊,高赐威. 基于用户响应的尖峰电价模型研究[J].华东电力,2013,41(1):42-46.
- [11]周永灿,李扬.考虑需求侧响应的尖峰电价实施效益的分析[J].电力需求侧管理,2009,11(2):12-14.
- [12]崔强,王秀丽,曾平良,等.调峰约束下考虑风电消纳的多目标尖峰电价决策模型[J].中国电机工程学报,2015,35(11):2662-2669.
- [13]AGHAEI J,ALIZADEH M I.Critical peak pricing with load control demand response program in unit commitment problem[J].IET Generation,Transmission & Distribution,2013,7(7):681-690.
- [14]张晓花,谢俊,朱正伟,等. 考虑不确定性的智能电网多目标机组组合研究[J]. 太阳能学报,2016,37(12):3055-3062.
- [15]ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004,19(1):620-628.

(责任编辑:李艳)