

6-9-2021

Day-Ahead Dispatching Model of Source-Load Coordination Based on Response Behavior to Real-Time Pricing

Liu Yun

Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

Han Song

Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

Qiuli Huang

Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Day-Ahead Dispatching Model of Source-Load Coordination Based on Response Behavior to Real-Time Pricing

Abstract

Abstract: In order to give full play to the regulating role of electricity price on the market, *considering the difference of consumers' response behavior to real-time pricing, consumers are divided into short-term consumers, mixed consumers and long-term consumers, and the real-time pricing models of three types of consumers are constructed based on the electricity price elasticity matrix. On this basis, a day-ahead dispatching model of source-load coordination based on consumer's response behavior to real-time pricing is established.* With the help of the MOST toolkits in MATPOWER and the Mosek solver, the arithmetic analysis is developed in a modified IEEE 57-buses system, and the comparison results with the traditional economic scheduling model prove the validity of the proposed model. The influence of different real-time pricing responses on economic dispatching is analyzed, and relevant discussions and conclusions have certain reference value for economic Dispatching considering demand response.

Keywords

real-time pricing, consumers'behavior, source-load coordination, day-ahead dispatching, MATPOWER

Recommended Citation

Liu Yun, Han Song, Huang Qiuli. Day-Ahead Dispatching Model of Source-Load Coordination Based on Response Behavior to Real-Time Pricing[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1196-1204.

基于实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型

刘芸, 韩松, 黄秋立

(贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为充分发挥电价对市场的调节作用, 考虑用户对实时电价响应行为的差异性, 将用户分为短期用户、混合用户和长期用户, 基于电量电价弹性矩阵构造了3类用户的实时电价模型。在此基础上, 建立了一种基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型。借助 MATPOWER 中的 MOST 工具包和 Mosek 求解器, 算例分析在一个修改 IEEE 7机 57 节点系统中展开, 与传统经济调度模型比较结果证明了所提模型的有效性。此外, 分析了不同用户响应行为对经济调度的影响, 相关讨论和结论对考虑需求响应的经济调度有一定的参考价值。

关键词: 实时电价; 用户行为; 源荷协调; 日前调度; MATPOWER

中图分类号: TM73; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 05-1196-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0031

Day-Ahead Dispatching Model of Source-Load Coordination Based on Response Behavior to Real-Time Pricing

Liu Yun, Han Song, Huang Qiuli

(Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to give full play to the regulating role of electricity price on the market, considering the difference of consumers' response behavior to real-time pricing, consumers are divided into short-term consumers, mixed consumers and long-term consumers, and the real-time pricing models of three types of consumers are constructed based on the electricity price elasticity matrix. On this basis, a day-ahead dispatching model of source-load coordination based on consumer's response behavior to real-time pricing is established. With the help of the MOST toolkits in MATPOWER and the Mosek solver, the arithmetic analysis is developed in a modified IEEE 57-buses system, and the comparison results with the traditional economic scheduling model prove the validity of the proposed model. The influence of different real-time pricing responses on economic dispatching is analyzed, and relevant discussions and conclusions have certain reference value for economic Dispatching considering demand response.

Keywords: real-time pricing; consumers' behavior; source-load coordination; day-ahead dispatching; MATPOWER

引言

电力系统日前调度的任务是以系统安全经济运行为目标, 优化次日各时段各机组发电计划, 以满足预测的次日负荷需求。随着新一轮电力改革的

迅速推进, 现货市场试点建设也相继启动^[1], 国家政策明确指出要坚持节能减排、积极实施需求响应 (Demand Response, DR), 充分发挥市场机制的作用。电价响应是一种有效的需求响应方式, 不同的用户对电价响应具有差异性, 这种差异性会给实施

收稿日期: 2020-01-10 修回日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51567006); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划(2018036); 贵州省科学技术基金(黔科合基础[2019]1100); 贵州省科技创新人才团队项目([2018]5615)

第一作者: 刘芸(1995-), 女, 硕士生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 595236304@qq.com

需求响应后用户用电量的调整以至电力系统经济调度效果带来不容忽视的影响。因此,开展基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型研究具有重要意义。

目前已有大量文献对智能电网环境下的需求响应进行了研究。文献[2]以所属行业为基准,将负荷分为大工业用电、商业用电和居民用电,考虑不同负荷对电价响应的差异性,将其融入传统调度,但其采用分时电价,可能会使需求响应的精细化程度不高。文献[3-4]建立了基于实时电价的大规模风电消纳机组组合模型,但未考虑用户对实时电价响应行为的差异性分类。文献[5]引入准实时电价,建立了考虑柔性负荷和系统旋转备用的含风电电力系统清洁经济调度模型,将柔性负荷分为可中断负荷和激励负荷,但这种分类未考虑可转移负荷,存在一定的局限性。文献[6]对分时电价环境下用户的需求响应行为进行分析,提出一种基于矩阵的用户负荷需求响应分析方法,但其重点关注可平移负荷的需求响应特性,考虑的用户种类偏少。文献[7-8]建立了家庭用电负荷下的需求响应模型,更适合于微电网,但对于大规模电力系统来说,其用户模型过多且复杂。文献[9]建立了计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度模型,考虑火电机组不同阶段的调峰寿命损耗,但并未考虑火电机组深度调峰时的煤耗特性,与实际情况存在一定的差异。

为充分发挥电价对市场的调节作用,本文提出基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型,利用 MOST (MATPOWER Optimal Scheduling Tools)^[10-11]对一个修改的 IEEE 7 机 57 节点系统^[12]进行算例分析,验证了本文模型的有效性。

1 面向需求响应的用户行为分类

1.1 价格型需求响应模型

价格型需求响应以电价变化引导用户调整用电方式,其中,实时电价的应用最为广泛,其精细化程度高,可灵活调节电价。

本文基于电量电价弹性矩阵(Price Elasticity Matrix, PEM)建立需求响应模型,电量电价弹性系数反应了用户对电价的敏感程度,如式(1)所示。

$$E(t, h) = \frac{p_{0,h}}{d_{0,t}} \times \frac{\delta d_t}{\delta p_h} \quad h = 1, 2, \dots, 24 \quad (1)$$

式中: $p_{0,h}$ 为 h 时刻原始电价; $d_{0,t}$ 为 t 时刻原始负荷; δp_h 为 h 时刻电价相对增量; δd_t 为 t 时刻负荷相对增量。

电量电价弹性系数分为自弹性系数和交叉弹性系数。自弹性系数表示负荷对当前时刻电价敏感度;交叉弹性系数表示负荷对其他时刻的价格敏感度,其表达式如式(2)~(3)所示。

$$E(t, h) \leq 0, \quad t = h \quad (2)$$

$$E(t, h) \geq 0, \quad t \neq h \quad (3)$$

实施需求响应后的用电量为

$$d_t = d_{0,t} \cdot \left[1 + \sum_{h=1}^{24} \frac{E(t, h) \cdot (p_h - p_{0,h})}{p_{0,h}} \right] \quad (4)$$

1.2 用户对实时电价响应行为的分类

用户的作息方式及其对用电舒适度的要求不同导致用户对实时电价的响应行为存在差异,进而使得用户对价格的敏感程度不同。为最大化需求响应的效益,本文考虑真实场景下用户对电价变化作出的反应,将用户分为以下 3 类^[13]:

(1) 短期用户(Short Range Consumers, SR):

此类用户只受当前时刻电价变化的影响,只能根据当前时刻价格变化来调整负荷。因此,其 PEM 只包含自弹性系数,矩阵结构如图 1(a)所示^[14]。这类用户可根据当前电价改变用电量,如商业楼宇空调类负荷、照明和家庭娱乐设备等。

(2) 混合型用户(Mixed Consumers, MC):

此类用户只受当前时刻及过去或未来一定时间范围内电价变化的影响,仅能改变当前时刻负荷或将负荷转移到过去或未来一定时间段内。因此,其 PEM 对角线两边均有非零元素,矩阵结构如图 1(b)所示。这类负荷可能只需在一段时间内有总耗电量需求,如蓄冷用户;也可能是用电曲线可整体平移,如大

工业用户中生产线可提前或延后生产的用户等。

(3) 长期用户(Long Range Consumers, LR):

此类用户受较长时间内电价变化的影响,可在长时间范围内优化消费。其 PEM 既包含自弹性系数,又包含交叉弹性系数,矩阵结构如图 1(c)所示。这类用户的各时段用电量可灵活调节,如家庭中的热水器和洗衣机、电动汽车充电站、储能以及高耗电行业类电力用户中生产方式较灵活的企业等。

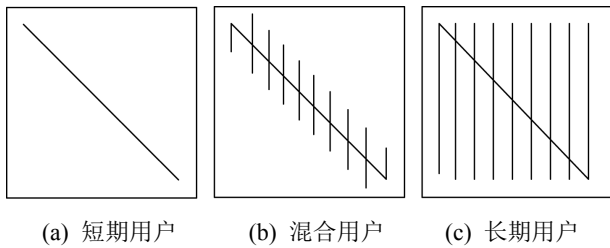


图 1 不同用户的 PEM 结构
Fig. 1 PEM structures for different consumers

2 日前调度模型及求解方法

2.1 目标函数

本文以最小化火电机组运行成本为目标函数,机组运行成本包括煤耗成本和启停机成本,表示为

$$\min F = \min \sum_{t=1}^T (F_i + C_{i,v} v_{i,t} + C_{i,\omega} \omega_{i,t}) \quad (5)$$

式中: F_i 为机组 i 的煤耗成本; $C_{i,v}$, $C_{i,\omega}$ 分别为机组 i 启动成本、停机成本; $v_{i,t}$, $\omega_{i,t}$ 为 t 时刻机组 i 的启停状态; T 为经济调度的时段数。

考虑火电深度调峰的煤耗特性,对调峰机组的二次煤耗成本函数进行严格的分段线性化^[15]处理。

$$F_i = f_{i,\min} \cdot u_i + \sum_k s_{ik} \cdot P_{ik} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{ik} \leq (P_{i,k,\max} - P_{i,(k-1),\max}) \cdot u_i$$

式中: $f_{i,\min}$ 为机组 i 在出力为 $P_{i,\min}$ 时的成本; u_i 为机组 i 的启停状态,投入运行为 1,退出运行为 0; s_{ik} 为机组 i 第 k 段斜率; P_{ik} 为机组 i 第 k 段的出力。

2.2 约束条件

为保证系统在任意时刻均能安全稳定运行,必须要满足以下约束条件:

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} + P_{W,t} = \sum_{n=1}^{N_{types}} d_{n,t} \quad (7)$$

式中: I 为火电机组数目; $P_{i,t}$ 为 t 时刻火电机组出力; $P_{W,t}$ 为 t 时刻风电出力; $d_{n,t}$ 为第 n 类用户 t 时刻的负荷; N_{types} 为用户类数。

(2) 备用容量约束

$$0 \leq P_{i,\max} - P_{i,t} \leq R_{i,\max+} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{i,t} - P_{i,\min} \leq R_{i,\max-} \quad (9)$$

式中: $P_{i,\max}$, $P_{i,\min}$ 分别为机组 i 最大、最小出力; $R_{i,\max+}$, $R_{i,\max-}$ 分别为机组 i 备用容量上、下限。

(3) 爬坡约束

$$0 \leq \delta_{i,t,+} \leq \delta_{i,\max+} \quad (10)$$

$$0 \leq \delta_{i,t,-} \leq \delta_{i,\min+} \quad (11)$$

式中: $\delta_{i,t,+}$, $\delta_{i,t,-}$ 为 t 时刻机组 i 的上、下坡容量; $\delta_{i,\max+}$, $\delta_{i,\min+}$ 为机组 i 的爬坡上、下限。

(4) 机组出力约束

$$u_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,\max} \quad (12)$$

(5) 启停机约束

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} = v_{i,t} - \omega_{i,t} \quad (13)$$

$$\sum_{y=t-\tau_i^++1}^t v_{i,t} \leq u_{i,t} \quad (14)$$

$$\sum_{y=t-\tau_i^-+1}^t \omega_{i,t} \leq 1 - u_{i,t} \quad (15)$$

式中: τ_i^+ , τ_i^- 为机组 i 的最小开机、停机时间。

(6) 潮流安全约束

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (16)$$

式中: $P_{l,t}$ 为 t 时刻通过线路 l 的有功功率; $P_{l,\max}$, $P_{l,\min}$ 分别为线路 l 的潮流约束上、下限。

(7) 价格型需求响应约束

实施需求响应后的负荷 d_t 如式(4),需求响应容量约束如式(17),电价约束如式(18),式(19)保证实施需求响应后用户的用电费用小于初始用电费用,式(20)保证需求响应前后用户用电量不变。

$$\mu_{\min} \cdot d_{n,0,t} \leq d_{n,t} \leq \mu_{\max} \cdot d_{n,0,t} \quad (17)$$

$$p_{n,\min} \leq p_{n,t} \leq p_{n,\max} \quad (18)$$

$$\sum_{n=1}^{N_{\text{types}}} \sum_{t=1}^T p_{n,t} d_{n,t} \leq \sum_{n=1}^{N_{\text{types}}} \sum_{t=1}^T p_{n,0} d_{n,0,t} \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T \Delta d_{n,t} = 0 \quad (20)$$

式中: $d_{n,0,t}$ 为第 n 类用户在 t 时刻的原始负荷; μ_{\max} , μ_{\min} 分别为负荷最大、最小响应系数; $p_{n,t}$ 为第 n 类用户优化后 t 时刻的电价; $p_{n,\max}$, $p_{n,\min}$ 分别为第 n 类用户的电价上、下限值; $p_{n,0}$ 为第 n 类用

户原始电价; $\Delta d_{n,t}$ 为响应后负荷的变化量。

2.3 求解方法

本文所提基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型的求解流程图见图 2。有别于传统模型, 本文所提模型考虑用户对电价响应行为的差异性, 将用户分为 3 类: 短期用户、混合用户和长期用户, 并采用 MOSEK^[16]对模型进行求解。

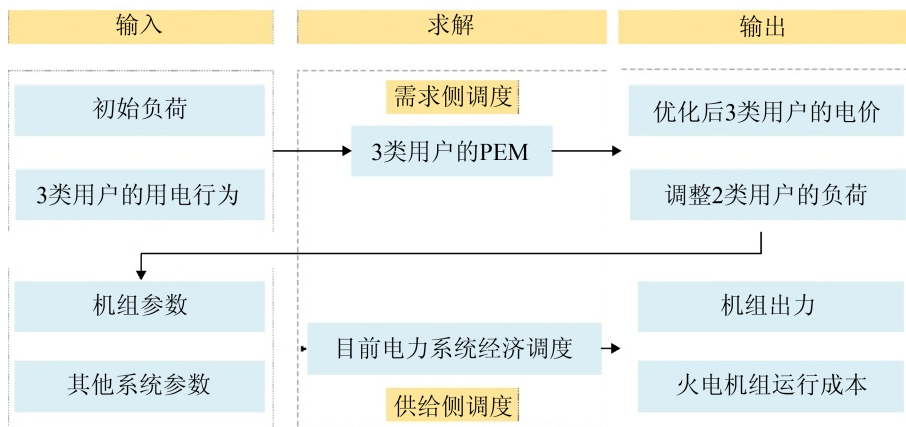


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Flow chart for proposed model

3 算例分析

3.1 算例系统

本文采用一个修改的 IEEE 7 机 57 节点系统进行仿真, 节点 6 接入一个 300 MW 的风电场, 系统接线图见附录 1, 机组参数见表 1。机组 3 和机组 7 为调峰机组, 调峰深度为 70%, 对调峰机组的成本函数进行严格的分段线性化处理; 其余机组的调峰深度均为 50%。选取比利时某风电场 2019 年 1 月 15 日的风电出力数据^[17]。24 h 负荷数据见图 3。3 类用户的电价数据见表 2, PEM 见附录 2。负荷允许变化范围为原负荷的 0.8~1.2 倍。MOSEK 仿真界面如附录 3 所示。

3.2 结果分析

3.2.1 所提模型有效性验证

为充分说明本文模型的有效性, 定义 2 种调度

模型进行对比分析。模型 1: 本文所提基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型; 模型 2: 不引入需求响应的传统经济调度模型。

2 种模式下的负荷曲线如图 4 所示。采用模型 1 和模型 2 时的负荷峰谷差分别为 568.49 MW, 798.69 MW。由此可知, 采用本文所提模型时, 优化后的负荷曲线相对平缓, 削峰填谷的效果更好。

表 1 机组参数
Tab. 1 Units' parameters

机组	容量/ MW	二次成本系数/ (元·MW ² h) ⁻¹	一次成本系数/ (元·(MWh) ⁻¹)	常数项成 本系数/元
1	575.88	0.010 837	116.55	5 872.5
2	100	0.062 672	124.63	1 024.1
3	140	-	-	-
4	100	0.063 201	125.68	1 032.7
5	550	0.011 539	120.92	5 703.6
6	100	0.062 407	124.10	1 019.7
7	410	-	-	-

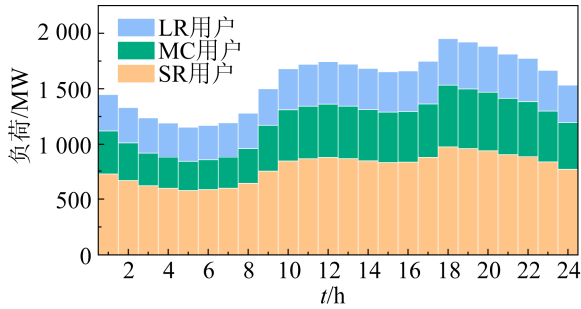


图3 24 h 负荷数据
Fig. 3 24 h-load data

表2 3类用户的电价数据
Tab. 2 Electricity price data for three types of consumers (元·(kWh)⁻¹)

用户类型	初始电价	电价允许变化范围
SR	0.53	0.3~1.0
MC	0.77	0.5~1.2
LR	0.66	0.4~1.1

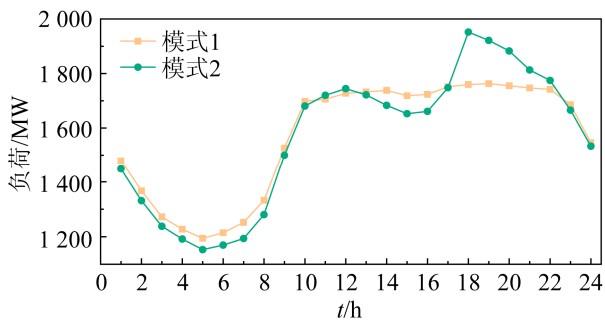


图4 2种模式下的负荷曲线图
Fig. 4 Load curves for two modes

2种模型下经济性对比如表3所示。从用户的角度看，由于模型1引入了需求响应，用户的用电费用相比采用模型2时降低了86.96万元，说明本文所提模型可充分发挥负荷的响应潜力，降低用户用电费用；从发电厂的角度看，实时电价起到了削峰填谷的作用，减轻了调峰机组的调峰负担，在一定程度上降低了火电机组的运行成本。

表3 2种模式下经济性对比
Tab. 3 Economic comparison between different modes (万元)

模型	用电费用	运行成本
1	2 266.15	5 297.89
2	2 353.11	5 312.66

不同用户实施需求响应前后的负荷曲线比较

见图5。由图5可见，LR用户削峰填谷的能力比SR用户和MC用户强，在优化过程中起主要调节作用。

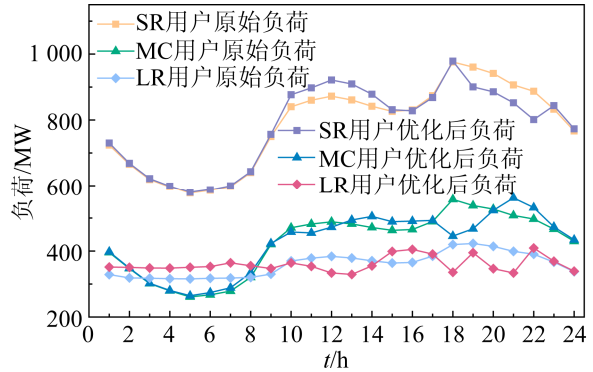


图5 不同用户实施需求响应前后的负荷曲线比较
Fig. 5 Comparison of load curves among different consumers with and without DR

2种模型下的机组出力见图6~7。需求响应的引入减小了系统峰谷差，平滑了负荷曲线，因此，采用模型1时，负荷高峰时段削峰效果明显，故模型1下机组5的出力曲线相比模型2更平缓；负荷低谷时段填谷效果明显，因此谷时段机组1和机组7的出力较模型2有所增大。

3.2.2 不同实时电价响应行为对所提模型的影响

为说明用户行为对本文所提模型的影响，计算3类用户单独参与日前调度的结果。用户初始电价为0.6元/kWh，电价允许变化范围为0.3~1.1元/kWh，负荷允许变化范围为原负荷的0.7~1.5倍。不同用户实施需求响应后的负荷和电价比较如图8所示。

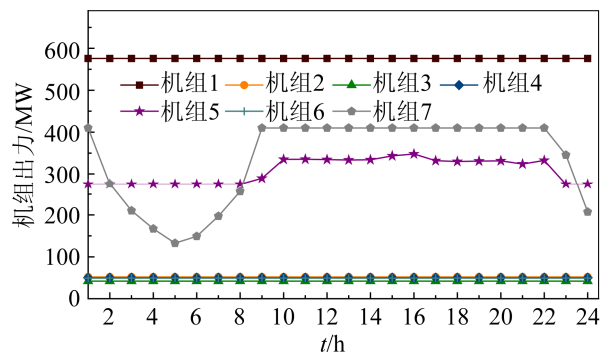


图6 采用模型1时的机组出力
Fig. 6 Unit output when model 1 is adopted

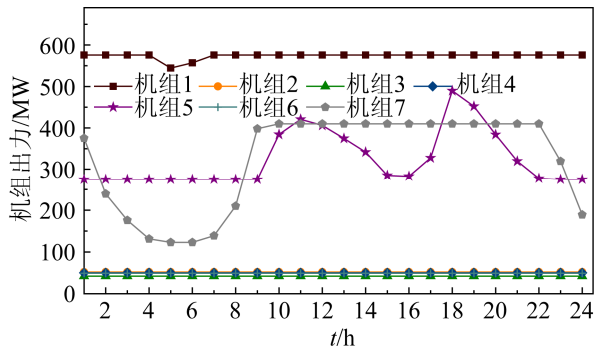


图 7 采用模型 2 时的机组出力

Fig. 7 Unit output when model 2 is adopted

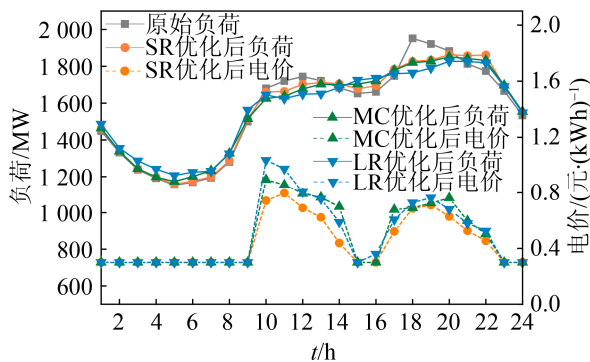


图 8 不同用户实施需求响应后的负荷和电价比较

Fig. 8 Comparison of load and electricity price among different consumers with DR

由图 8 可见, LR 用户优化后负荷峰谷差最小, MC 用户次之, SR 用户最大。LR 用户受全天各时刻电价的影响, 对电价响应的敏感程度最高, 故其峰时段电价最高, 峰谷电价差最大, 其优化后的负荷曲线比另 2 类用户更平缓。MC 用户只受短时间内电价变化的影响, 对电价响应的敏感程度低于 LR 用户, 因此, 其需求响应后的峰谷电价差和负荷峰谷差仅次于 LR 用户; SR 用户只受当前时刻电价的影响, 电价响应敏感度最低, 所以其优化后峰谷电价差最小, 负荷峰谷差最大。

不同用户实施需求响应后的经济性对比见表 4。结合图 8 和表 4 可知, 优化后 LR 用户的平均电价最高, MC 用户次之, SR 用户最低, 用户用电费用随平均电价的提高而增加; 对发电厂来说, 电厂运行成本随用户对电价响应敏感程度的提高而降低。用户对电价响应敏感程度越高, 参与需求响应后调节负荷的能力越强, 系统负荷峰谷差越

小, 火电机组成本随之降低。

表 4 不同用户实施需求响应后的经济性对比

Tab. 4 Economy comparison among consumers with DR

用户类型	平均电价/ (元·(kWh) ⁻¹)	用电费用/ 万元	节省用电 费用/万元	运行成 本/万元
SR	0.45	1 747.99	605.12	4 664.99
MC	0.49	1 941.69	411.42	4 656.75
LR	0.50	1 951.47	401.64	4 655.89

4 结论

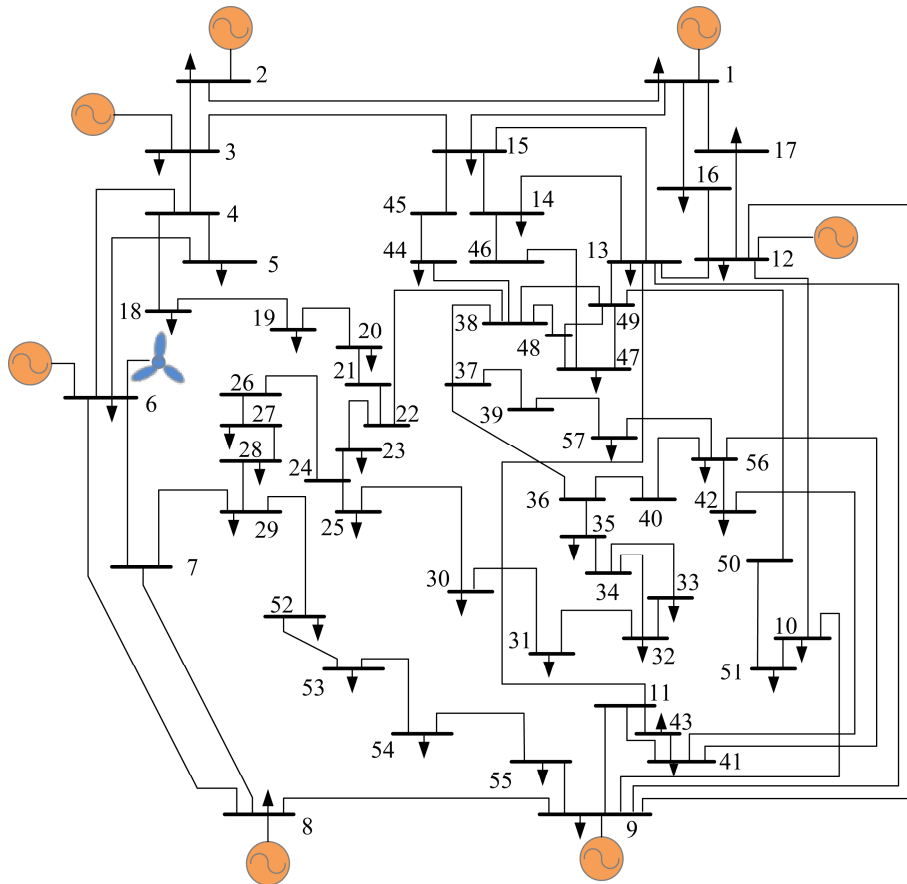
本文提出了一种基于用户对实时电价响应行为的源荷协调日前调度模型, 一个修改的 IEEE 7 机 57 节点系统的算例结果证明了该模型的有效性。此外, 分析表明: 随用户对电价响应敏感程度的提高, 经济调度优化后系统的负荷峰谷差减小, 火电机组运行成本降低。与此同时, 用户平均电价的提高导致用户节省用电费用减少, 这种情况下应考虑给有意愿参与需求响应的用户一定的辅助补贴。

参考文献:

- [1] 张粒子, 刘方, 许通, 等. 多运营主体梯级水电站参与的日前市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 104-110, 231-234.
Zhang Lizi, Liu Fang, Xu Tong, et al. Clearing Model for Day-Ahead Market with Participation of Multi-Operator Cascade Hydropower Stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 104-110, 231-234.
- [2] 唐学军, 韩佶, 苗世洪, 等. 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 116-123.
Tang Xuejun, Han Ji, Miao Shihong, et al. Coordinated Control Model of Multi-Type Load Based on Demand Response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 116-123.
- [3] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 基于实时电价的大规模风电消纳机组组合和经济调度模型[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 2955-2963.
Liu Xiaocong, Wang Beibei, Li Yang, et al. Unit Commitment Model and Economic Dispatch Model Based on Real Time Pricing for Large-Scale Wind Power Accommodation[J]. Power System Technology, 2014,

- 38(11): 2955-2963.
- [4] Jin S, Botterud A, Ryan S M. Impact of Demand Response on Thermal Generation Investment with High Wind Penetration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2013, 4(4): 2374-2383.
- [5] 傅利, 周步祥, 王小红, 等. 计及用户侧响应的含风电电力系统清洁经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 74-79.
Fu Li, Zhou Buxiang, Wang Xiaohong, et al. Environment-Friendly and Economic Dispatching with Wind Farms Integration and Demand Response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 74-79.
- [6] 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]. 电力系统及其自动化学报, 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.
- [7] Joo L, Choi D. Optimal Household Appliance Scheduling Considering Consumer's Electricity Bill Target[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics (S0098-3063), 2017, 63(1): 19-27.
- [8] 郝文斌, 李银奇. 不同电价机制下含光伏发电的家庭负荷调度经济性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 34-42.
Hao Wenbin, Li Yinqi. Economic Study of Household Load Scheduling of a Smart Home with Photovoltaic System Under Different Pricing Mechanisms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 34-42.
- [9] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 37-59.
Deng Tingting, Lou Suhua, Tian Xu, et al. Optimal Dispatch of Power System Integrated with Wind Power Considering Demand Response and Deep Peak Regulation of Thermal Power Units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 37-59.
- [10] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Thomas R J. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2011, 26(1): 12-19.
- [11] Murillo-Sánchez C E, Zimmerman R D, Anderson C L, et al. Secure Planning and Operations of Systems With Stochastic Sources, Energy Storage, and Active Demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2013, 4(4): 2220-2229.
- [12] Iraj Dabbagchi. Power Systems Test Case Archive [EB/OL]. University of Washington, [2014-06-12]. <http://www2.ee.washington.edu/research/pstca>.
- [13] Dadkhah A, Vahidi B. On the Network Economic, Technical and Reliability Characteristics Improvement Through Demand-Response Implementation Considering Consumers' Behaviour[J]. IET Generation, Transmission & Distribution (S1751-8687), 2018, 12(2): 431-440.
- [14] Kirschen D S, Strbac G, Cumperayot P, et al. Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2000, 15(2): 612-617.
- [15] Wu L. A Tighter Piecewise Linear Approximation of Quadratic Cost Curves for Unit Commitment Problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2011, 26(4): 2581-2583.
- [16] MOSEK ApS. The MOSEK Optimization Tools Version 8.1 [EB/OL]. [2017-08-24]. <https://www.mosek.com/>.
- [17] Elia. Wind-Power Generation Data[EB/OL]. [2019-03-21]. <http://www.elia.be/en/grid-data/power-generation/wind-power>.

附录 1: 系统接线图



附图 1 系统接线图
Fig. 1 System diagram

附录 2: 电量电价弹性系数

SR、MC 和 LR 用户的自弹性系数相同。

附表 1 SR 用户的自弹性系数
Tab. 1 Self-elasticity coefficient for SR

时刻	自弹性系数	时刻	自弹性系数	时刻	自弹性系数	时刻	自弹性系数
1	-0.02	7	-0.01	13	-0.13	19	-0.25
2	-0.01	8	-0.01	14	-0.12	20	-0.22
3	-0.01	9	-0.02	15	-0.03	21	-0.20
4	-0.01	10	-0.10	16	-0.04	22	-0.20
5	-0.01	11	-0.10	17	-0.16	23	-0.03
6	-0.01	12	-0.13	18	-0.45	24	-0.02

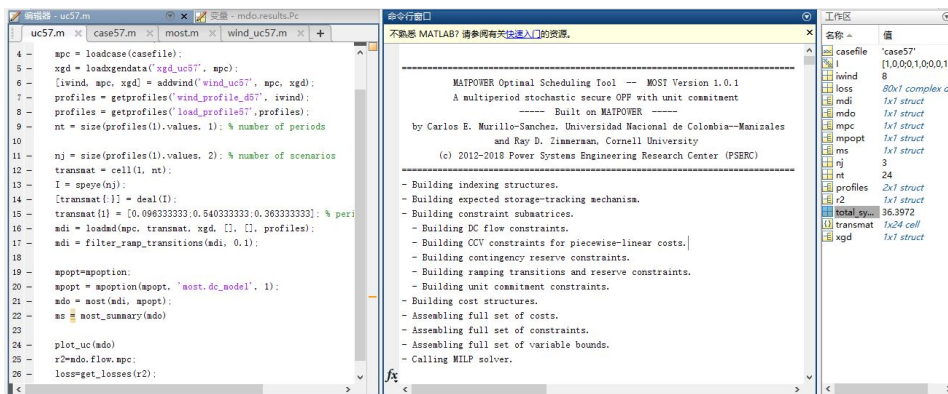
附表 2 MC 用户的非 0 交叉弹性系数
Tab. 2 Cross elasticity coefficient for MC

时刻	10	11	12	13	17	18	19	20	21	22
5	-	-	-	-	-	-	-	0.010	0.010	0.010
9	0.019	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.019	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0.018	0.019	0.020	-	-	-	-	-	-	-
12	0.017	0.018	0.019	0.020	-	-	-	-	-	-
14	-0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-0.100	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-0.160	-	0.100	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-0.160	0.025	0.200	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	0.120	-	-	-	-
19	-	-	-	-	0.025	0.025	0.020	0.017	-	-
20	-	-	-	-	0.025	0.025	0.020	0.017	0.015	-
21	-	-	-	-	-0.160	0.100	0.080	0.025	0.020	-
22	-	-	-	-	-	-0.450	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	0.019	-0.250	-	-	-
24	-	-	-	-	-	0.020	0.190	-0.220	-	-

附表 3 LR 用户的非 0 交叉弹性系数
Tab. 3 Cross elasticity coefficient for LR

时刻	7	8	9	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	22
1	-	-	-	-	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
2	0.010	0.010	0.010	0.012	0.012	0.013	0.011	0.015	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
3	-	-	-	0.016	0.015	0.015	0.014	0.016	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4	-	-	-	0.018	0.016	0.016	0.015	0.017	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
5	-	-	-	0.020	0.019	0.018	0.018	0.018	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
6	-	-	-	0.020	0.019	0.019	0.018	0.019	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
7	-	0.017	0.018	0.019	0.020	0.022	0.020	0.019	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	-	-	0.015	0.016	0.018	0.019	0.017	0.021	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
9	-	-	-	0.015	0.017	0.018	0.017	0.016	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	0.015	0.016	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.013	0.019	0.017	0.017	0.010	0.010
16	-	-	-	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.014	0.020	0.018	0.018	0.017	0.010
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.180	0.016	0.015	0.015	0.013

附录 3: 系统仿真界面



附图 2 系统仿真界面
Fig. 2 Simulation system interfaces

<http://www.china-simulation.com>