

削峰填谷最优时基于 DSM 分时电价的确定与分析

吴秋伟¹, 汪 蕾², 程浩忠¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 作为用户侧电价的一种, 分时电价目前在世界各国得到了广泛的应用, 而且分时电价是需求侧管理 DSM(Demand Side Management) 的一种重要手段。分时电价可以刺激和鼓励用户主动改变消费行为和用电方式, 达到削峰填谷的目的, 从而提高电力系统的运行效率和稳定性。建立削峰填谷最优时基于 DSM 分时电价的数学模型, 利用数值仿真验证了该分时电价的削峰填谷作用。

关键词: 分时电价; 需求侧管理; 削峰填谷; 数值仿真

中图分类号: TM731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)03-0010-04

0 引言

电价理论是电力市场的核心理论^[1]。在电力市场环境下, 确定合理的用户侧电价, 可以使用户积极参与电力工业改革, 调整用电方式和用电结构, 使负荷保持在一个比较平稳的状态, 提高电力系统运行效率和稳定性。作为用户侧电价的一种, 分时电价目前在世界各国得到了广泛的应用, 而且分时电价是需求侧管理的一种重要手段。在我国, DSM 和分时电价也得到了广泛的研究。文献[2]和[3]认为我国目前实行实时电价的条件不具备, 但实行分时电价是必不可少的。文献[4]主要针对江苏省实行分时电价后大工业用户的响应进行了分析, 认为实行分时电价具有一定的负荷调节效果。文献[5]提出了用户反应的概念来描述电价对负荷的影响, 并提出了基于 DSM 的分时电价的数学模型, 但它们均未涉及平时段电价的确定问题。文献[6]对平时段电价的确定进行了探索性研究, 提出了用 MCP 计算的平均购电电价来确定平时段电价, 将文献[5]的工作拓广到与电力市场报价端相关联的模型研究, 从一个可行的途径将分时电价市场化, 得到适应电力市场条件的分时电价体系。但是, 由于 MCP 对平时段电价的限制, 文献[6]确定的分时电价不能得到使削峰填谷最优的平时段电价。从电力系统角度来考虑, 要尽可能地减小峰负荷和提高谷负荷, 这样才能最大可能地提高电力系统运行效率和稳定性。因此, 本文对削峰填谷效果最优时分时电价的确定进行了研究, 提出了削峰填谷效果最优时分时

电价数学模型。

1 基于 DSM 与用户购电费用的分时电价数学模型

本文仍采用文献[6]中用户反应定义和数学模型描述电价对负荷的控制作用。

1.1 基本假设与参量的设定

1.1.1 基本假设

(a) 实行分时电价前后每天的总用电量保持不变。

(b) 调整到某一时段的电量按时间轴平均分配。

(c) 文中只考虑了价格对用户需求的影响, 其他因素的影响需进一步研究; 同样文中只考虑了用户需求对价格的影响, 其他因素(如燃料价格)对价格的影响暂时忽略。

根据国外实行需求侧管理的经验, 在实行需求侧管理后, 一般用电量略有增加或基本保持不变, 因而假定实行分时电价前后用电量保持不变是合理的。与文献[4~6]一样, 假设(b)尤其是假设(c)是为了使本文的讨论得以顺利进行所作的简化性假设, 消除假设(c)是一个十分重要的问题, 有待进一步的研究。

1.1.2 参量的设定

1) 时段的划分

我们将一天 24 h 划分为 3 类时段: T_f 、 T_p 、 T_g , 满足:

$$T_f + T_p + T_g = 24 \quad (1)$$

其中: T_f 为峰时段; T_p 为平时段; T_g 为谷时段。

在本文中, 我们假定时段划分确定, 即根据负荷曲线中负荷的分布来进行时段划分。时段划分的具

基金项目: 高等学校优秀青年教师科研奖励计划资助 (ZDXM03006)

体数值为:

峰负荷时段: 8:00 ~ 12:00(峰 1), 18:00 ~ 22:00(峰 2);平负荷时段: 12:00 ~ 18:00(平 1), 22:00 ~ 24:00(平 2);谷负荷时段: 0:00 ~ 4:00(谷 1), 4:00 ~ 8:00(谷 2)。

2) 电价的确定

峰、平、谷时段的电价分别为: P_f 、 P_p 、 P_g 。满足:

$$P_f = P_p = \dots \quad (2)$$

$$P_g = P_p - \dots \quad (3)$$

其中: Δ 为谷时段电价对平时段电价的拉开度; β 为峰时段电价对平时段电价拉开度与谷时段电价对平时段电价拉开度的比值。

3) 用电量

某负荷代表日的负荷曲线为 $L = L(t)$ ($0 \leq t \leq 24$), 则:

$$Q = \int_0^{24} L(t) dt = \int_{t_f}^{t_p} L(t) dt + \int_{t_p}^{t_g} L(t) dt + \int_{t_g}^{t_f} L(t) dt + \dots$$

$$L(t) dt = Q_f + Q_p + Q_g \quad (4)$$

其中: Q 为全天用电量; Q_f 为峰时段的用电量; Q_p 为平时段的用电量; Q_g 为谷时段的用电量。

1.2 分时电价数学模型

本文根据 DSM 的总体目标 and 经济学中的会计学原理,从供需两侧出发建立了分时电价模型。

1) 供方获利

实行分时电价前供电方的销售收入为:

$$M_0 = Q \cdot P_0 \quad (5)$$

其中: P_0 为实行分时电价前平均购电费用。

实行分时电价后供电方的销售收入为:

$$M_{TOU} = Q_{fTOU} \cdot (P_p + \dots) + Q_{pTOU} \cdot P_p + Q_{gTOU} \cdot (P_p - \dots) \quad (6)$$

其中: Q_{fTOU} 、 Q_{pTOU} 、 Q_{gTOU} 为实行分时电价后峰、平、谷时段的用电量。

实行分时电价后供电方通过削峰可以节约的电力建设投资为 M' 。

供电方获利的约束条件是:

$$M_{TOU} \geq M_0 - M' \quad (7)$$

2) 用户端受益

实行分时电价前用户电费支出:

$$m_0 = M_0 \quad (8)$$

实行分时电价后用户电费支出:

$$m_{TOU} = M_{TOU} \quad (9)$$

用户受益即电费支出不增加:

$$m_0 \geq m_{TOU} \quad (10)$$

即:

$$M_0 \geq M_{TOU} \quad (11)$$

综合 1)、2) 可以得到数学模型的约束条件为:

$$M_0 - M' \leq M_{TOU} \leq M_0 \quad (12)$$

3) 优化目标

尽可能减小峰负荷,提高谷负荷,从而提高电力系统的负荷率、电力系统的运行效率和稳定性,并且尽可能减少用户购电费用,从而达到社会效益最优的目的。因此,目标函数为:

目标函数 1:

$$\min[L_{\max} - \Delta_{\max}(L(t, \dots))] \quad (13)$$

目标函数 2:

$$\max[L_{\min} - \Delta_{\min}(L(t, \dots))] \quad (14)$$

目标函数 3:

$$\min[\max(L(t, \dots)) - \min(L(t, \dots))] \quad (15)$$

其中: $L(t, \dots)$ 为实行分时电价后,在给定的条件和条件下用户反应后的负荷。

目标函数 1 用来实现峰负荷最小,目标函数 2 用来实现谷负荷最大,目标函数 3 用来实现峰谷负荷差最小。

从目标函数来看,为了实现削峰填谷最优的目标,进行单目标优化是不够的,因此选用双目标优化。观察目标函数 1、2 和 3,可以发现,如果选用目标函数 2 和另外一个函数进行双目标优化的话,由于优化的方向不一致,会使进行双目标优化存在困难,如果选取目标函数 1 和 3 进行双目标优化的话,优化方向一致,所以比较容易解决这个问题。而且,目标函数 1 和 3 的优化可以保证削峰填谷最优,因为当峰负荷和峰谷负荷差都最小时,也即是峰负荷最小和谷负荷最大。

多目标优化的方法很多,最简单和实用的是加权系数法^[7]。在加权系数法中,最主要的就是确定权值。由于本文模型是首次提出,缺乏相应的数据和方法,因此,在本文多目标优化过程中,利用权值尝试法来确定目标函数的权值。

2 仿真与结果比较

本文利用浙江某地区典型日负荷数据进行数值仿真。

2.1 目标函数权值的确定

如前文所述,确定目标函数的权值时采用权值尝试法,通过比较在目标函数取不同权值时的峰负荷与谷负荷仿真结果来确定目标函数的权值,如表 1 所示。

表 1 目标函数取不同权值时仿真结果

Tab.1 Simulation results when weights of objective function are different

目标函数 1 权值	目标函数 3 权值	峰负荷 /MW	谷负荷 /MW	用户购电费用/ 10^7 元
0.1	0.9	6 959.6	5 918.2	6.618 6
0.2	0.8	6 959.6	5 918.2	6.601 5
0.3	0.7	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.4	0.6	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.5	0.5	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.6	0.4	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.7	0.3	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.8	0.2	6 944.9	5 899.6	6.591 0
0.9	0.1	6 944.9	5 899.6	6.591 0

通过比较仿真结果可以看出,目标函数 3 占的比例比较大时,峰谷负荷差最小,而且峰负荷与实行分时电价前比减少了 821.4 MW,可以在削峰和填谷之间达到最佳均衡。因此,本文对目标函数 1、3 的权值取为 0.2、0.8。

2.2 仿真算法

(a) 取一平时段电价初值,根据数学模型算出满足约束条件的平时段电价的上界和下界;

(b) 从中选出使峰负荷最小和峰谷负荷差最小在权值为 0.2、0.8 时达到最佳均衡时的平时段电价;

(c) 算出此平时段电价下的最优拉开度和反应后负荷。

2.3 实行分时电价前数据

(a) 典型日负荷数据如表 2 所示。

表 2 典型日负荷数据

Tab.2 Load data of a typical day

T	负荷/MW	T	负荷/MW	T	负荷/MW	T	负荷/MW
1	5 110	7	5 960	13	6 825	19	7 780
2	5 325	8	6 435	14	6 925	20	7 750
3	5 200	9	7 175	15	6 860	21	7 290
4	4 910	10	7 340	16	6 860	22	6 810
5	5 435	11	7 525	17	7 290	23	5 815
6	5 660	12	6 700	18	7 350	24	5 535

(b) 实行分时电价前最大负荷、最小负荷和用户购电费用: $L_{max} = 7 780$ MW; $L_{min} = 4 910$ MW; $m_0 = 6.624 3 \times 10^7$ 元。

2.4 仿真结果

削峰填谷最优时分时电价和用户反应后负荷数据如下:

$= 0.360 0$, $= 0.450 0$ 元/kW; $P_f = 0.677 0$ 元/kW, $P_p = 0.515 0$ 元/kW, $P_g = 0.065 0$ 元/kW; k

$= 10.415 4$ (k 为峰时段电价与谷时段电价的比值); $L_{max} = 6 945.6$ MW; $L_{min} = 5 900.6$ MW; $M_{TOU} = 6.573 0 \times 10^7$ 元。

仿真结果与原始负荷数据比较如图 1 所示。

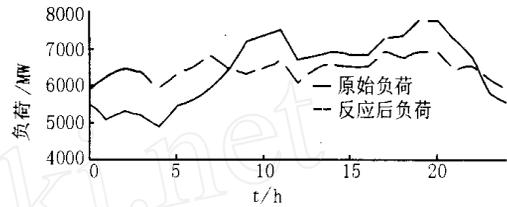


图 1 削峰填谷最优时分时电价仿真结果与原始负荷比较图

Fig. 1 Comparison of simulation results and original load data when load shifting is optimal

图 1 表明,削峰填谷最优分时电价实行后,能够起到很好的削峰和填谷的作用。从数值上看,削峰填谷最优分时电价实行后,峰负荷为 6 945.6 MW,比实行分时电价前减少了 834.4 MW,谷负荷为 5 900.6 MW,比实行分时电价前增加了 990.6 MW。

2.5 与文献[5,6]仿真结果比较

本文仿真结果和文献[5,6]仿真结果如表 3 和图 2 所示。

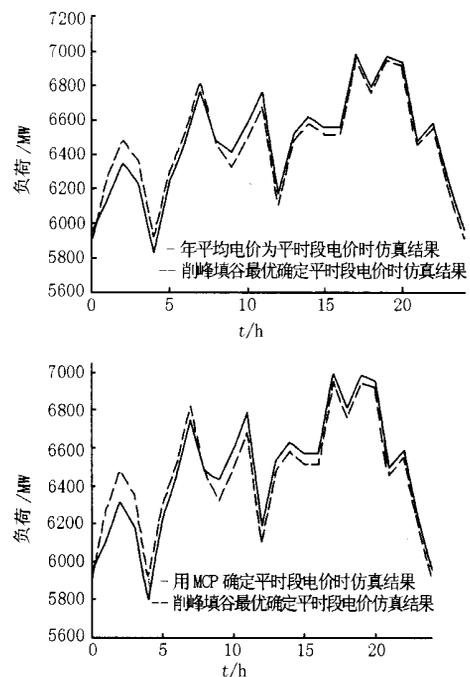


图 2 本文仿真结果与文献[5,6]仿真结果比较

Fig. 2 Comparison of simulation results in this paper and Ref. [5,6]

表 3 仿真结果数值比较

Tab. 3 Comparison of simulation results

分时电 价方式	峰负荷 /MW	谷负荷 /MW	峰谷负荷 差/MW	峰谷电 价比	用户购电费 用/元
削峰填谷最 优分时电价	6 959.6	5 918.2	1 041.4	10.415 4	6.601 5 ×10 ⁷
以年平均电价为平 时段电价分时电价	6 984.1	5 824.7	1 159.9	3.647 3	6.245 1 ×10 ⁷
基于 DSM 与 MCP 分时电价	6 998.0	5 797.7	1 200.3	3.500 0	6.215 6 ×10 ⁷

从图 2 可以看出,本文确定的分时电价实行后能起到更好的削峰填谷作用。从数值上看,本文确定的分时电价实行后,峰负荷为 6 959.6 MW,比文献[5]仿真结果小了 24.5 MW,比文献[6]仿真结果小了 38.4 MW;谷负荷为 5 918.2MW,比文献[5]仿真结果大了 93.5 MW,比文献[6]大了 120.5 MW。

但是,如果从用户购电费用角度看,本文确定的分时电价实行后,用户购电费用为 6.601 5 ×10⁷ 元,比文献[5]确定的分时电价实行后用户购电费用大 6.129 ×10⁶ 元,比文献[6]确定的分时电价实行后用户购电费用大 6.424 ×10⁶ 元。

由此可见,虽然本文确定的分时电价可以更好地起到削峰填谷作用,但是使用户购电费用增加很多。

2.6 本文分时电价数学模型在实际中的应用构想

在实际应用中,各地区可以根据用户调查确定各类用户反应函数的值,根据本地区削峰填谷的需要确定分时电价的具体的值。

3 结论

本文建立了削峰填谷最优时分时电价数学模型,利用 MATLAB 进行了数值仿真,验证了本文数学模型确定的分时电价可以起到很好的削峰填谷作用。与文献[5,6]仿真结果比较表明,本文确定的分时电价可以起到更好的削峰填谷作用,但是相应的用户购电费用也增加很多。因此,如何在削峰填谷和减少用户购电费用之间达到最佳均衡、使社会效益最大需要进一步的研究。为了使本文研究顺利进行,本文设定了三个基本假设,如何消除假设 b),尤其是消除假设 c)有待进一步的研究。另外,时段划分也是分时电价中一个很重要的研究内容,如何将时段划分和电价确定一起考虑也有待进一步研究。本文对分时电价在实际中的应用进行了构想,但是如何结合实际情况确定分时电价有待进一步研究,而且这是一个有着很重大的经济价值的研究。

参考文献:

[1] 于而铿,韩放,谢开,等(YU Er-keng, HAN Fang, XIE

Kai, et al). 电力市场(Power Market)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998.

[2] 郑斌,王秀丽(JIA Bin, WANG Xiur-li). 电力市场电价理论的分析与综述(1):边际成本电价理论(Analysis and Summarization of Power Price Theory in Power Market, Part One: Power Price Theory of Marginal Cost)[A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第 15 届学术年会论文集(Proceedings of 15th Academic Annual Convention of Power Systems and Automation)[C]. 武汉(Wuhan):1999. 1202-1207.

[3] 郑斌,王秀丽(JIA Bin, WANG Xiur-li). 电力市场电价理论的分析与综述(2):竞价机制及转运电价(Analysis and Summarization of Power Price Theory in Power Market, Part Two: Mechanism of Auction and Price of Transportation)[A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第 15 届学术年会论文集(Proceedings of 15th Academic Annual Convention of Power Systems and Automation)[C]. 武汉(Wuhan):1999. 1208-1215.

[4] 李扬,王治华,卢毅,等(LI Yang, WANG Zhi-hua, LU Yi, et al). 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应(The Implementation of Peak and Valley Time Price for Electricity and the Response of Large Industries)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)2001,25(8):45-48.

[5] 汤玉东,王明飞,吴军基,等(TANG Yur-dong, WANG Ming-fei, WU Jun-ji, et al). 基于 DSM 的分时电价研究(Research on DSM-based TOU)[J]. 电力需求侧管理(Power Demand Side Management),2000,(3):14-16.

[6] 吴秋伟,汪蕾,邹云(WU Qiu-wei, WANG Lei, ZOU Yun). 基于 DSM 与 MCP 的分时电价模型研究(Model Research of TOU Power Price Based on DSM and MCP)[J]. 电力需求侧管理(Power Demand Side Management),2003,5(1):24-29.

[7] 徐光辉(XU Guang-hui). 运筹学基础手册(Basic Brochure of Operational Research)[M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),1999.

收稿日期:2003-06-26; 修回日期:2003-08-27

作者简介:

吴秋伟(1977-),男,博士,从事电力市场方向的研究;

汪蕾(1978-),男,工程师,从事电力调度和工程建设方面的工作;

程浩忠(1962-),男,博士生导师,致力于电力系统规划、安全经济运行、电压稳定、电力市场、电能质量、无功补偿、配电自动化系统的研究。

(下转第 25 页 continued on page 25)

参考文献:

- [1] Wester C G. High Impedance Fault Detection on Distribution Systems [A]. Conf Rec IEEE Rural Electric Power Conf, 1998. C5-1-5.
- [2] 沈中耀 (SHEN Zhong-yao). 小电流接地系统对地绝缘监测探讨 (Detection on Insulation of Floating Neutral Point Power System to earth) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 1999, 19(5): 57-58.
- [3] 曾克娥, 王少荣, 余文辉, 等 (ZENG Ke-e, WANG Shao-rong, YU Wen-hui, et al). 中性点不接地电网中的高阻接地故障 (High-resistance Single-phase Earth Fault in a Neutral Point Earth Free Power System) [J]. 水电能源科学 (International Journal Hydroelectric Energy), 2000, 18(3): 41-43.
- [4] 贾秀芳, 赵成勇, 李宝树, 等 (JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong, LI Bao-shu, et al). 变频探测直流系统接地故障装置存在的问题 (The Existing Questions of Frequency Conversion Detection Earth Fault Apparatus for DC System) [J]. 继电器 (Relay), 1999, 27(3): 51-52.
- [5] Baldwin T, Renovich F, Saunders L, Lubkeman D. Fault Locating in Ungrounded and High-resistance Grounded Systems [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2001, 37: 1152-1159.
- [6] 吴大榕 (WU Da-rong). 电机学 (Electromechanics) [M]. 北京: 水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1978.

收稿日期: 2003-01-06; 修回日期: 2003-09-28

作者简介:

庄劲武 (1967-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统及其安全运行;

张晓锋 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统及其安全运行、电力推进技术、控制理论。

Application of step-response method in the insulation fault location of earth-floating AC system

ZHUANG Jiu-wu, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Chao

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Power network ground capacitance can influence the correctness of fault location, which is hard to be overcome with existing fault location method. To solve this problem, a new method—step-response method is developed and presented in this paper. The method can achieve separation between the characteristic value reflecting the ground resistance and the value reflecting the ground capacitance in time domain. Moreover, the characteristic value is also separated from the power-frequency signals of power network in frequency domain and can be picked up easily. The paper reaches the conclusions based on both theoretical analysis and experimental research.

Key words: step-response method; earth-floating AC system; insulation fault location

(上接第 13 页 continued from page 13)

Determination and analysis of TOU power price based on DSM when load shifting optimized

WU Qiu-wei¹, WANG Lei², CHENG Hao-zhong¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210094, China)

Abstract: As one of power prices to consumers, TOU power price is widely used in the world. It is an important method in DSM. With the popularization of TOU power price, the power consuming modes of consumers could optimize, the power loads condition could be stable, and the efficiency and stability of power systems could be improved. In this paper, a new mathematical model of TOU power price is developed when load shifting is optimized based on DSM. Digital simulation is set up using MATLAB. It is verified that using TOU power price can achieve the goal of load shifting. Merits and defects of TOU power price are obtained by comparing simulation results of Ref. [5] with that of Ref. [6]. The effects of TOU power price is satisfactory.

This project is supported by the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teacher in Higher Education Institutions of MOE, P. R. China.

Key words: time-of-use (TOU) power price; DSM; load shifting; digital simulation