

一种激励相容的电力市场可中断负荷管理合同模型

方 勇, 张少华, 李渝曾

(上海大学自动化系, 上海市 200072)

摘要: 电力市场环境下, 电力公司与用户之间存在的信息不对称性可能会导致可中断负荷管理的低效。文中提出了一种激励相容的可中断负荷管理合同模型, 可引导用户自愿披露真实缺电成本信息。该模型能考虑用户的最大可中断负荷限制, 并能适用于负荷中断分配的不同优化目标, 如电力公司利润最大或用户缺电成本最小等。采用蒙特卡洛模拟方法的算例表明了该模型的有效性。

关键词: 电力市场; 可中断负荷管理合同; 激励相容; 蒙特卡洛模拟

中图分类号: TM73; F123.9

0 引言

作为电力系统需求侧管理(DSM)的重要组成部分, 可中断负荷管理利用用户的用电灵活性, 来缓解负荷高峰时的供电紧张状况, 以避免或减少昂贵的旋转备用和满足用电需求增长而需要的发电容量投资。2000 年的美国加州电力危机使人们重新认识到可中断负荷合同作为一种电力可靠性资源在市场环境下的巨大潜在价值, 它正从传统的管制型行为转为参与者在市场环境下的自愿行为, 并且将成为供电公司改善竞争能力的有效工具^[1]。

可中断负荷管理合同涉及中断负荷的分配和补偿支付等问题。为了实现电力资源的有效利用, 电力公司在确定中断负荷的分配时需要有关用户缺电成本的真实信息。然而, 市场环境下电力公司与用户之间存在信息不对称, 用户知道自己的真实缺电成本特性, 但电力公司不知道, 这会导致用户在参与可中断负荷管理时虚报其缺电成本信息。电力公司只能依赖用户的上报信息决定中断负荷的分配, 因而可能造成用电分配的低效。因此, 在确定中断负荷的补偿支付机制时, 应充分考虑该机制对于用户自愿披露其真实缺电成本信息的激励作用。假如用户披露其真实缺电成本信息会使之获得最大的期望利润, 则该中断补偿支付机制就具有激励相容(incentive compatibility)特性。显然, 满足激励相容特性的可中断负荷管理合同在电力市场环境下更具有现实的社会、经济意义。

假设用户具有线性的缺电成本函数, 文献[2]指出, 如果用户要求对其在高电价时自愿减少用电的意愿保证一固定的回报(即价格折扣), 则它可通过对由合同保证的电力卖出一个看涨期权(call

option)给电力公司来达到这一目的, 并证明当用户选择中断负荷的单位补偿支付(即期权敲定价)等于其真实的单位缺电成本(或用电价值)时, 其期望利润最大。文献[3]进一步考虑了中断供电可提前通知的情况, 提出了带有双看涨期权(double call option)的合同模型。这 2 种可中断合同模型均具有引导理性用户披露其真实缺电损失的激励相容特性。然而文献[4]指出, 实际的用户缺电成本近似于负荷中断量的二次函数。据此, 文献[5]基于二次用户缺电成本函数的假设, 并引入连续取值的用户类型参数(为私人信息), 严格应用信息经济学中的机制设计(mechanism design)理论和显示原理(revelation principle), 提出了适用于不同类型用户的激励相容的中断管理合同模型。文献[6]进一步给出了利用历史数据估计用户类型参数和缺电成本函数的方法, 利用机制设计思想和一个启发式的近似求解算法, 发展了用户类型参数离散取值时的中断管理合同模型。然而, 以上 2 种模型均无法考虑用户的最大可中断负荷限制, 而实际上即使类型相同的用户, 其最大可中断负荷也可能很不相同, 这大大限制了模型的实用性。

本文假设电力公司对用户的缺电成本特性具有一定的估计信息, 提出一种能考虑用户最大可中断负荷限制的可中断负荷管理合同模型, 该模型具有引导用户自愿披露真实信息的激励相容特性, 而且能适用于负荷中断分配的不同优化目标, 如电力公司利润最大或用户缺电成本最小等。并对算例采用蒙特卡洛模拟方法验证模型的有效性。

1 负荷中断的最优分配问题

设有 N 个理性用户愿意参与某电力公司的可中断负荷管理, 由于不同的用户通常具有不同的缺电成本特性, 引入参数 θ_i 来表示不同的用户类型。

与文献[5,6]类似,假设用户 i 的缺电成本函数为:

$$C_i(\theta_i, x_i) = K_1 x_i^2 + K_2 \theta_i x_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: x_i 为用户 i 的负荷中断量; K_1, K_2 为常数,可根据历史的用户缺电成本数据利用统计学方法确定; θ_i 是一个 0 到 1 之间的连续变量,用于表示用户的负荷中断意愿, θ_i 取值越大,用户的边际缺电成本越高,意味着用户越不愿意中断负荷。

假设可中断用户的类型参数已知,电力公司对于负荷中断管理的目标有 2 种可能。

第 1 种可能是在紧急情况下,且可供利用的区外电力有限,为保证供电的安全可靠,必须中断一定数量的负荷,电力公司将决定每个可中断用户的负荷中断量,使得总的用户缺电成本最小,即:

$$\min_{x_i} \sum_{i=1}^N C_i(\theta_i, x_i) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } x_i \leq x_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = D \quad (4)$$

式中: D 表示需要中断的总负荷量; $x_{i,\max}$ 表示用户 i 的最大可中断负荷量。

该优化问题的一阶最优条件可表示为:

$$\frac{dC_i}{dx_i} = \mu - \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: λ_i 为约束式(3)的拉格朗日乘子,它反映了用户 i 的最大可中断能力对于电力公司的价值; μ 为约束式(4)的拉格朗日乘子,即电力公司的边际缺电成本。

利用式(1)、式(5)可表示为:

$$2K_1 x_i + K_2 \theta_i = \mu - \lambda_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

由式(6)可知,用户 i 的类型参数 θ_i 越大,即它的边际缺电成本越高,则其负荷中断量越小。

第 2 种可能是电力公司可按一定价格向区外售电的情况下,基于经济性考虑,在区外售电价格较高时,充分利用本地区可中断用户的灵活性,来获取更多的经济效益,此时电力公司将决定每个可中断用户的负荷中断量,使得其总利润最大,即:

$$\max_{x_i} \sum_{i=1}^N (x_i p_s - y_i) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } x_i \leq x_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中: p_s 为区外售电价格,通常为负荷中断量 x_i 的减函数; y_i 表示电力公司对用户 i 的被中断负荷 x_i 的经济补偿支付。

该优化问题的一阶最优条件可表示为:

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_i} = p_s + x_i \frac{\partial p_s}{\partial x_i} - \lambda_i \quad (9)$$

2 负荷中断的激励相容补偿方法

在电力市场环境下,用户类型参数 θ_i 是用户的

私人信息,电力公司并不完全了解。假设电力公司根据有关历史数据,认为用户 i 的真实类型参数 θ_i 服从某一具有下限 $\theta_{i,\min}$ 、上限 $\theta_{i,\max}$ 的已知概率分布,且 $\theta_i \in [\theta_{i,\min}, \theta_{i,\max}]$,并事先向所有可中断用户公布这种估计信息。缺电成本系数 K_1 和 K_2 、电力公司采用的负荷中断分配方法、需要中断的总负荷量和每个用户的最大可中断负荷,以及电力公司的区外售电价格等信息假设为公共信息。

电力公司对用户的被中断负荷的补偿支付分为缺电成本补偿和信息补偿 2 部分,即:

$$y_i(\hat{\theta}_i, x_i(\hat{\theta}_i)) = C_i(\hat{\theta}_i, x_i(\hat{\theta}_i)) + \epsilon_i(\hat{\theta}_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中: $\hat{\theta}_i$ 表示用户 i 上报的用户类型参数; $x_i(\hat{\theta}_i)$ 表示用户 i 上报类型参数为 $\hat{\theta}_i$ 时,电力公司通过第 1 节介绍的负荷中断管理决策所得到的用户 i 的负荷中断量; $C_i(\hat{\theta}_i, x_i(\hat{\theta}_i))$ 表示用户 i 上报类型参数为 $\hat{\theta}_i$ 时,电力公司采用负荷中断管理决策后计算的用户 i 缺电成本; $\epsilon_i(\hat{\theta}_i)$ 为用户 i 上报类型参数为 $\hat{\theta}_i$ 时得到的信息补偿。

2.1 信息补偿 $\epsilon_i(\hat{\theta}_i)$ 的确定

理性的可中断用户在向电力公司上报用户类型参数时,将各自追求期望利润最大。用户 i 自己估计的期望利润为:

$$\pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) = y_i(\hat{\theta}_i, \bar{x}_i(\hat{\theta}_i)) - C_i(\hat{\theta}_i, \bar{x}_i(\hat{\theta}_i)) = K_2(\hat{\theta}_i - \theta_i)\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) + \epsilon_i(\hat{\theta}_i) \quad (11)$$

式中: $\bar{x}_i(\hat{\theta}_i)$ 表示在该时段内用户 i 上报类型参数为 $\hat{\theta}_i$ 、而其他用户的类型参数取估计的各自概率分布中每一个可能值时的期望中断负荷量。

激励相容条件要求用户上报真实类型参数时期望利润最大,即当 $\hat{\theta}_i = \theta_i$ 时,满足一阶最优条件 $\partial \pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) / \partial \hat{\theta}_i = 0$ 。则:

$$[K_2 \bar{x}_i(\hat{\theta}_i) + K_2(\hat{\theta}_i - \theta_i)(\bar{x}_i(\hat{\theta}_i))' + \epsilon_i'(\hat{\theta}_i)]|_{\hat{\theta}_i=\theta_i} = 0 \quad (12)$$

$$\text{即: } \epsilon_i'(\theta_i) = -K_2 \bar{x}_i(\theta_i) \quad (13)$$

对式(13)两边同时进行从用户类型参数 θ_i 到其估计的上限 $\theta_{i,\max}$ 的积分:

$$\epsilon_i(\theta_{i,\max}) - \epsilon_i(\theta_i) = -K_2 \int_{\theta_i}^{\theta_{i,\max}} \bar{x}_i(\theta) d\theta \quad (14)$$

令 $\epsilon_i(\theta_{i,\max}) = 0$, 则:

$$\epsilon_i(\theta_i) = K_2 \int_{\theta_i}^{\theta_{i,\max}} \bar{x}_i(\theta) d\theta \quad (15)$$

当用户 i 上报类型参数为 $\hat{\theta}_i$ 时,信息补偿项取为:

$$\epsilon_i(\hat{\theta}_i) = K_2 \int_{\hat{\theta}_i}^{\theta_{i,\max}} \bar{x}_i(\theta) d\theta \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

由式(16)可知,用户得到的信息补偿与用户上报的类型信息、电力公司估计的该用户真实类型参数的概率分布信息密切相关。在给定电力公司估计的概率分布信息后,如果用户低报类型参数,尽管可

能会得到较多的信息补偿,但其缺电成本补偿减少;反之,如果用户高报类型参数,虽然可以得到较多的缺电成本补偿,但其信息补偿会减少。第 2.2 节将证明用户上报真实类型参数是使其利润最大化的惟一解。另一方面,当用户上报真实类型参数时,假如电力公司完全了解用户的真实类型信息,则信息补偿为 0;电力公司对用户的类型信息越模糊,则将支付较多的信息补偿。

2.2 激励相容特性的证明

由式(11)和式(16)可知,当用户 i 上报的类型参数 $\hat{\theta}_i$ 偏离真实参数 θ_i 时,其期望利润与上报真实信息时的期望利润之差为:

$$\begin{aligned} \pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) - \pi_i(\theta_i, \theta_i) &= K_2(\hat{\theta}_i - \theta_i)\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) + \\ &K_2 \int_{\hat{\theta}_i}^{\theta_i, \max} \bar{x}_i(\theta) d\theta - K_2 \int_{\theta_i}^{\theta_i, \max} \bar{x}_i(\theta) d\theta = \\ &K_2(\hat{\theta}_i - \theta_i)\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) - K_2 \int_{\theta_i}^{\hat{\theta}_i} \bar{x}_i(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (17)$$

利用微分中值定理,式(17)可化为:

$$\pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) - \pi_i(\theta_i, \theta_i) = K_2(\hat{\theta}_i - \theta_i)[\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) - \bar{x}_i(\xi)] \quad (18)$$

式中: ξ 为 $\hat{\theta}_i$ 与 θ_i 之间的一个数。

当用户上报类型参数小于真实类型参数,即 $\hat{\theta}_i < \theta_i$ 时,则 $\xi \in (\hat{\theta}_i, \theta_i)$ 。因 $\bar{x}_i(\cdot)$ 为递减函数,即 $\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) > \bar{x}_i(\xi)$,由式(18)得 $\pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) - \pi_i(\theta_i, \theta_i) < 0$;当用户上报类型参数大于真实类型参数,即 $\hat{\theta}_i > \theta_i$ 时,则 $\xi \in (\theta_i, \hat{\theta}_i)$,即 $\bar{x}_i(\hat{\theta}_i) < \bar{x}_i(\xi)$,则由式(18)可知 $\pi_i(\hat{\theta}_i, \theta_i) - \pi_i(\theta_i, \theta_i) < 0$ 。因此,当用户上报类型参数偏离其真实信息时,其期望利润将减少。上报真实类型参数(即 $\hat{\theta}_i = \theta_i$)为用户期望利润最大化的惟一解,即式(10)和式(16)给出的负荷中断补偿支付机制具有激励相容特性。

3 算例仿真

假设在某一时段,某电力公司由于某些原因而导致供电不足,需要削减 18 MW 负荷 1 h,电力公司采用用户缺电成本最小化的方法来确定每个可中断用户的负荷中断量。设有 6 个可中断用户愿意参与该电力公司的中断负荷管理,其最大可中断负荷与真实类型参数如表 1 所示。假设对于用户 $i(i=1, 2, \dots, 6)$,电力公司和其他可中断用户 $j(j \neq i)$ 估计的其真实类型参数服从均匀概率分布,表 1 给出了估计的各用户类型参数的上、下限。取 $K_1 = 0.000 25$ 元/(kW · h), $K_2 = 2.3$ 元/(kW · h)。采用蒙特卡洛模拟法来计算 $\bar{x}_i(\hat{\theta}_i)$ 。

对于用户 1,由于其类型参数(包括估计的概率分布内的参数)相对较小,因而中断负荷的分配结果一般具有较大的负荷中断量。而由于其最大可中断

表 1 用户的最大可中断负荷、真实类型参数和估计的类型参数分布

Table 1 Customers' maximum interruptible loads, true type parameters and the estimated distribution of type parameters

用户	最大可中断负荷/MW	真实类型参数	估计的类型参数	
			下限	上限
1	4	0.10	0.06	0.22
2	5	0.15	0.10	0.24
3	8	0.20	0.15	0.28
4	10	0.40	0.36	0.46
5	15	0.70	0.62	0.75
6	20	0.80	0.70	0.84

负荷较小,因此无论别的可中断用户在其估计的分布范围内上报什么类型参数,用户 1 在一定的类型范围内上报类型参数,其负荷中断量可能均会达到其最大可中断负荷限制。此时,由式(11)和式(16)可知,用户 1 上报的类型参数将不影响其期望利润,也就是说,用户 1 在一个类型参数范围内(包括其真实类型)上报类型都能获得最大利润。图 1 给出了用户 1 的期望利润随其上报类型参数变化的仿真曲线。用户 1 在类型参数范围 0.06~0.15 内上报类型时都能获得最大期望利润。

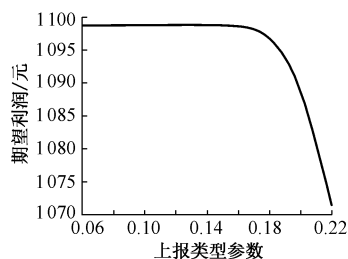


图 1 用户 1 的期望利润随上报类型参数变化曲线

Fig. 1 Customer 1's expected profit versus its claimed type parameter

我们认为,当上报真实类型时的期望利润不小于其他情况下的期望利润时,理性用户会披露真实类型参数。对于其他用户,上报真实类型参数是其期望利润最大化的惟一解。如对于用户 2 和用户 5,其期望利润随其上报类型参数变化的曲线分别如图 2 和图 3 所示。

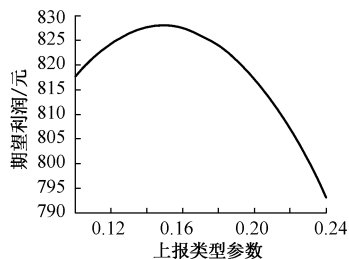


图 2 用户 2 的期望利润随上报类型参数变化曲线

Fig. 2 Customer 2's expected profit versus its claimed type parameter

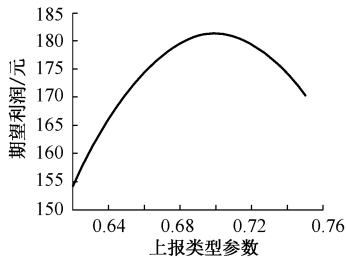


图3 用户5的期望利润随上报类型参数变化曲线
Fig.3 Customer 5's expected profit versus its claimed type parameter

由图2、图3可知,用户2、用户5只有上报真实的类型参数0.15和0.70时,才能获得最大期望利润,即本文给出的负荷中断补偿支付机制具有激励相容特性。

根据用户上报的真实类型参数,电力公司按用户缺电成本最小化而得到的用户负荷中断方案和中断补偿支付结果如表2所示。其中,用户利润定义为负荷中断补偿减去缺电成本,在数值上与用户得到的信息补偿相等,它与电力公司估计的用户真实类型参数的概率分布信息密切相关。

表2 用户缺电成本最小化的负荷中断方案
Table 2 Load curtailment scheme for minimizing customers' outage cost

用 户	负荷中断 量/MW	中断补偿 支付/元	单位电量补偿/ (元·(kW·h) ⁻¹)	用户利 润/元	单位电量利润/ (元·(kW·h) ⁻¹)
1	4.00	6 018.7	1.504	1 098.7	0.275
2	4.18	6 638.2	1.588	828.0	0.198
3	3.95	6 415.6	1.624	697.9	0.177
4	3.03	5 485.1	1.810	402.3	0.133
5	1.65	3 518.3	2.132	181.2	0.110
6	1.19	2 649.2	2.226	105.5	0.089

在区外售电价格较高时,电力公司还有可能以其利润最大化为目标来确定每个可中断用户的负荷中断量。在此情况下,也可以验证本文给出的中断负荷补偿支付机制满足激励相容条件。限于篇幅,在此从略。

AN INCENTIVE COMPATIBLE CONTRACT FOR INTERRUPTIBLE
LOAD MANAGEMENT IN ELECTRICITY MARKET

Fang Yong, Zhang Shaohua, Li Yuzeng (Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In electricity market, the informational asymmetries between utilities and customers may cause inefficiencies in interruptible load management. An incentive compatible contract model is developed for interruptible load management, which can lead customers to voluntarily reveal their true outage costs information. The proposed model allows customers having maximum interruptible load constraints to be taken into account and can apply to different optimization objectives for dispatching the interruptible customers, such as maximizing the utility's benefit or minimizing the total outage cost of customers. A numerical example using Monte Carlo simulation method is presented to verify the effectiveness of the proposed model.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50107006).

Key words: electricity market; contracts for interruptible load management; incentive compatibility; Monte Carlo simulation

4 结语

本文针对电力市场环境由于信息不对称而可能导致的可中断负荷管理的低效,提出了一种激励相容的可中断负荷管理合同模型。该模型能考虑用户的最大可中断负荷限制,并计入电力公司对于不同用户真实缺电成本信息的不同了解程度,在一定程度上反映了具有信息优势的用户可以得到更多的信息补偿。该模型能适用于负荷中断分配的不同优化目标,如电力公司利润最大或用户缺电成本最小等。采用蒙特卡洛模拟方法的算例仿真表明了该模型的有效性。该模型可用于市场环境下可中断负荷管理合同的制定,并有助于实现电力资源的有效分配和社会福利最优。

参考文献

1 Gehring K L. Can Yesterday's Demand-side Management Lessons Become Tomorrow's Market Solutions. The Electricity Journal, 2002, 15(5): 63~69
2 Gedra T W, Varaiya P P. Markets and Pricing for Interruptible Electric Power. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 122~128
3 Oren S S. Integrating Real and Financial Options in Demand-side Electricity Contracts. Decision Support Systems, 2001, 30(3): 279~288
4 Electric Power Research Institute. Designing an Integrated Menu of Electric Service Options: Modeling Customer Demand for Priority Service Using C-VALU—The Niagara Mohawk Application. Technical Report TR-100523, 1992(10)
5 Fahrioglu M, Alvarado F L. Designing Incentive Compatible Contracts for Effective Demand Management. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1255~1260
6 Fahrioglu M, Alvarado F L. Using Utility Information to Calibrate Customer Demand Management Behavior Models. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 317~322

方 勇(1976—),男,博士研究生,研究方向为电力市场机制设计、远期合同建模研究。E-mail: fangyongtm@163.com

张少华(1966—),男,博士,副教授,主要从事电力市场远期合同建模、博弈分析等研究。

李渝曾(1947—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力市场输电定价、博弈分析等研究。