

考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究

董军, 张婧, 陈小良, 甘德一

(华北电力大学工商管理学院, 北京 102206)

摘要: 以可中断负荷这种典型的需求侧响应项目为研究对象, 构建了考虑补偿费用的用户需求函数。通过分析需求侧响应前后电力市场中的供给—需求关系的变化, 研究需求侧响应项目参与输电阻塞管理时对发电商、用户以及全社会的经济效益的影响。构建了补偿费用函数, 量化了具体的补偿费用, 从而促进用户上报其真实类型和缺电成本; 在此基础上构建了一种全新的计及需求侧响应的短期输电阻塞管理模型。研究工作能够为合理制定补偿标准提供理论依据, 并验证了需求侧响应是一种经济快捷的缓解输电阻塞的有效资源。

关键词: 需求响应; 阻塞管理; 补偿费用; 需求弹性

Study on short-run congestion management model and incentive mechanism considering demand response

DONG Jun, ZHANG Jing, CHEN Xiao-liang, GAN De-yi

(School of Business Administration, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper defines a demand function which aims at a classic demand response program—interruptible load, and this function takes compensation fees into account. By analyzing the changes of the demand and supply before and after the demand response program is executed, this paper studies the impacts of demand response program on the economic benefits of generators, consumers and the whole society. It also builds compensation fees function to quantify the compensation fees so as to inspire the consumers to report their actual load type and cost of load curtailment. Then it constructs an innovative short-run congest management model considering the demand response. The research work can provide theory support for the establishment of compensation criterion and testify that demand response program is an economic and effective resource to relieve the transmission congestion.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.70771039).

Key words: demand response; congestion management; compensation fees; demand elasticity

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0024-05

0 引言

随着电力市场化改革, 电力系统的利益主体逐步多元化, 需求侧资源在竞争市场中的作用正在被重新认识。美国加州电力危机发生的一个主要原因就是发电公司利用加州市场结构、政策中存在的没有需方电价反馈、没有利用电力需求侧的弹性等缺陷^[1]。在电力市场中引入需求侧响应, 把需求侧和供应侧同等对待, 是形成良性运行市场的必然要求^[2]。

需求侧响应项目在国外尤其是美国取得了良好的成果, 根据美国各个ISO/RTO的统计^[3], 在2006年夏季高峰负荷时期, 通过实施DR降低了系统1.4%~4.1%的高峰负荷。其他国家和地区(如英国、

北欧、澳大利亚等)的电力市场也开展了DR项目。我国的需求侧响应项目尚未大规模推广, 福建、河北、江苏、云南等省已经积极开展电力需求侧管理项目, 取得了良好的成果, 但是这些需求侧管理项目目前还只是重在采用市场价格手段之外的更为广泛的一些措施, 如提高终端用电效率和峰荷转移等, 还没有发展到运用市场价格去影响需求的时间和水平的阶段, 也就是还没有实现从需求侧管理向需求侧响应的质的飞跃。此外我国的需求侧管理工作还存在一些问题。例如我国的峰谷电价比不尽合理, 国外的峰谷电价比一般为5~8倍, 最高的可达到9~10倍, 而我国仅有2~3倍^[4]。目前尚未出台明确的可中断负荷补偿标准, 河北省规定对尖峰期自愿中断负荷的企业, 每1万千瓦累计中断1h补贴1万元^[5], 这种补偿标准太过笼统, 没有考虑到用户的类型, 无法对用户产生有效的激励。目前的研究主

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(70771039)

要集中在实时电价^[6-8]、可中断负荷电价定价^[9-10]等方面, 并已经取得了一定的研究成果, 在短期输电阻塞管理措施中考虑需求侧因素的研究很有限^[11-12], 几乎没有对需求侧响应项目的补偿费用的定量研究, 本文就在这种背景下研究了考虑需求侧响应的短期输电阻塞管理模型, 以及如何制定补偿标准以激励用户参与需求侧响应项目, 并且真实上报用户类型和缺电成本。

1 需求弹性和计及需求响应的用户需求函数

需求侧响应的定义为: 电力市场中的用户针对市场价格信号或者激励机制做出响应, 并改变正常电力消费模式的市场参与行为。在市场电价较高或者电力系统可靠性受到危害时往往需要用户做出响应以缓解严峻的电力供应形势。需求侧响应项目大致分为两类^[13]: 一类是激励性的响应项目, 包括可中断负荷、需求回购计划、紧急需求响应、容量机制以及开展辅助服务市场等。这类项目的特点在于需求侧放弃或者出售一部分负荷需求, 获得相应的经济补偿; 一类是基于价格的响应项目, 包括实时电价 (RTP)、按时间段使用电价 (TOU) 等。此类项目的特点在于支付给用户的费率不是固定的, 而是随着时间的推移浮动, 其主要目的在于通过提高高峰荷时期电价和降低非峰荷时期电价来引导负荷需求平均分配, 形成比较平坦的负荷曲线。

需求弹性的定义为需求的变化量相对于价格的变化量的比率, 其表达式为:

$$E = \frac{\partial Q}{\partial \rho} = \frac{\rho_0}{Q_0} \times \frac{dD}{d\rho} \quad (1)$$

相对于不同时期电价的变动, 需求侧有不同的反应。有些负荷不能从一个时期转移到另一个时期 (例如照明负荷), 只能保持“开”或“停”两种状态之一。因此这种负荷在特定时期只有一个灵敏度, 被称为“自我弹性”, 通常为负值。有些负荷能够从峰荷时段转移到非峰荷时段或者低负荷时期 (例如洗碗机的使用可以转移到非峰荷时段)。这种负荷在不同时期具有不同的灵敏度, 用“交叉弹性” (cross elasticity) 来表示, “交叉弹性”一般取正值。

“自我需求弹性”和“交叉需求弹性”的表达式分别为:

$$E_{aa} = \frac{\Delta Q_a}{\Delta \rho_a} \leq 0 \quad (2)$$

$$E_{ab} = \frac{\Delta Q_a}{\Delta \rho_b} \geq 0 \quad (3)$$

本文以第一种类型的负荷作为研究对象。需求侧作为一种资源参与阻塞管理时, 如果执行了中断负荷或者转移负荷的合约, 系统运营机构会支付用户一笔费用以补偿停电损失。在这种情况下, 用户的需求函数由需求弹性和补偿费用共同决定。我们假定用户的需求函数是线性的, 根据弹性和斜率的相关关系, 我们可以得到需求函数的表达式为:

$$Q = Q_0 + E_i \cdot \frac{Q_0}{\rho_0} \cdot \Delta \rho \quad (4)$$

而考虑补偿费用时,

$$\Delta \rho = \rho - \rho_0 + \text{Compensation}(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) \quad (5)$$

其中: $\text{Compensation}(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i))$ 为补偿费用。补偿费用由用户上报的类型 θ'_i 和用户上报的可中断负荷电量 $\Delta P_{di}(\theta'_i)$ 决定。

故参与需求侧响应项目的用户的需求函数为:

$$Q = Q_0 + E_i \cdot \frac{Q_0}{\rho_0} \cdot [\rho - \rho_0 + \text{Comp}(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i))] \quad (6)$$

式 (6) 表明补偿费用越高, 需求弹性越大, 用户同意削减的负荷电量就越大。

2 需求侧响应参与阻塞管理的经济效益分析

本文用一个简单的供给——需求关系示意图来研究需求侧响应项目参与阻塞管理时对发电商、用户以及全社会的经济效益的影响。如图 1。

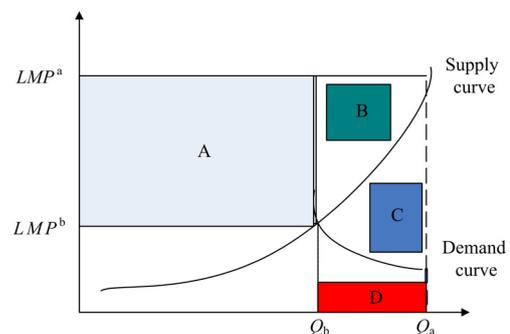


图 1 需求侧响应项目的经济效益示意图

Fig.1 Economic benefits of demand side response projects

图中区域 A 表示发电商经济剩余转移给未采取中断或转移措施的负荷的经济效益。需求侧响应项目会导致电价下降, 从而使得发电商的收益受到损失, 为没有加入需求侧响应项目的用户创造了“搭便车”的机会。这部分经济效益的表达式为:

$$A = Q^b \times (LMP^a - LMP^b) \quad (7)$$

其中: Q^b 表示负荷响应之后的总电力需求; LMP^a 与 LMP^b 分别表示负荷响应前后的节点边际电价。

区域 B 表示发电商经济剩余转移给响应负荷的经济效益。这部分收益的来源和区域 A 相似,区别在于此部分的受益者为需求侧响应项目的参与用户。其表达式为:

$$B = (Q^a - Q^b) \times LMP^a - \int_{Q^b}^{Q^a} MC(Q)dQ \quad (8)$$

其中: $MC(Q)$ 为发电商的边际成本曲线,也就是图中的供给曲线。

区域 C 为需求侧响应项目带来的社会福利,这部分收益由系统运营机构保管。

$$C = \int_{Q^b}^{Q^a} LMP(Q_s)dQ_s - \int_{Q^b}^{Q^a} LMP(Q_d)dQ_d \quad (9)$$

其中: $LMP(Q_d)$ 为参与需求侧响应项目的用户的节点电价曲线; $LMP(Q_s)$ 为发电商的节点电价曲线(假定发电商基于边际成本报价)。

区域 D 表示系统运营机构支付给响应用户的激励或者补偿费用,它能够激励用户积极响应市场形势,及时削减负荷或者将负荷转移到非峰荷时段。我们用单位补偿费用与负荷削减数量的乘积近似表示补偿费用:

$$D = (Q^a - Q^b) \times A \quad (10)$$

其中: A 为单位补偿费用。

实际上补偿费用的确定是一项很复杂的工作,对于不同的用户其补偿标准也不相同。本文将在第三部分深入研究补偿费用的确定方法。

从图 1 中可以发现,如果社会福利(区域 C)大于激励费用(区域 D),需求侧响应项目就能够产生净收益。而社会福利由发电商供给曲线和用户的需求曲线以及市场等因素决定。因此,在发电商的供给能力既定的情况下,需求侧响应项目是否盈利很大程度上取决于用户的需求函数和补偿标准。根据前面的分析,补偿费用对用户的需求有刺激作用,补偿标准越高,用户的响应度就越高,削减和转移的负荷也相应增大。此外,未参与需求侧响应的用户虽然没有获得补偿费用,但却是潜在的受益者。市场上很可能出现“搭便车”的投机者,有些用户可能会不参与需求侧响应项目,或者在执行响应措施时会对负荷削减量打折扣。这种投机现象会在负荷作为一种资源参与竞价的交易模式下表现得更加明显。因此,如何制定合理的激励标准,如何引导用户积极响应市场需求,如何避免用户的投机行为,是目前亟待解决的几个问题。

3 需求侧参与阻塞管理的激励费用的确定

需求侧参与阻塞管理可以通过两种方式获得补偿额,一种方法类似于 ISO、PX 或 SC 等机构对用户的停电价格进行评估,如通过确定失负荷价值(value of lost load)以补偿削减负荷的损失;另一种方法是由用户申报可中断负荷容量及其相应的缺电成本。系统调度根据缺电成本顺序进行排列,同时计算停电补偿费,按低价优先原则,根据缺电成本由低到高顺序切除可中断负荷。负荷需求量随价格弹性变化,当电价上升超过缺电成本时,用户愿意选择停电获得补偿。本文选取第二种方式进行研究。

不同用户 i 通常具有不同的缺电成本,如文献[14],缺电成本函数表达式为:

$$C_i(\theta_i, \Delta P_{di}) = K_1(\Delta P_{di})^2 + K_2\theta_i\Delta P_{di}, i \in I \quad (11)$$

式中: I 为参与阻塞管理的负荷集合; ΔP_{di} 为可中断负荷量; K_1, K_2 为常数,可根据历史的用户缺电成本函数确定; θ_i 为用户类型,其值在 0~1 之间连续,在市场环境下该参数为私人信息, θ_i 值越大,意味着用户边际缺电成本越高,在中断相同负荷时,获得的补偿应该越多。

为避免用户在上报其类型时的投机行为,在设置补偿费用时需要加入激励因素,使用户在上报真实类型时获得利润最大。因此在该补偿机制下,用户能够上报真实缺电成本参与阻塞管理,系统运营机构根据上报的用户类型及阻塞情况,优化选取可中断负荷,消除阻塞。系统运营机构对参与需求侧响应项目的用户的补偿费用包括缺电成本补偿和信息补偿两部分^[15]。信息补偿用以激励用户上报其真实的缺电成本。补偿费用函数为:

$$\begin{aligned} \text{Compensation}_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) = \\ C_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) + \phi_i(\theta'_i) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: θ'_i 表示用户上报的类型; $\Delta P_{di}(\theta'_i)$ 为用户上报的可中断负荷量; $C_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i))$ 和 $\phi_i(\theta'_i)$ 分别为用户上报类型为 θ'_i 时的缺电成本补偿和信息补偿。

用户上报类型为 θ'_i 时获得的利润为:

$$\begin{aligned} \varphi_i(\theta'_i) = \text{Compensation}_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) - \\ C_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) = K_2(\theta'_i - \theta_i)\Delta P_{di}(\theta'_i) + \phi_i(\theta'_i) \end{aligned} \quad (13)$$

要激励用户上报真实类型,则必须满足用户上报真实类型时获得利润最大。即 $\theta'_i = \theta_i$ 时,

$$\left. \frac{\partial \phi_i(\theta'_i)}{\partial \theta'_i} \right|_{\theta'_i=\theta_i} = 0。因此,$$

$$K_2 \Delta P_{di}(\theta'_i) + K_2(\theta'_i - \theta_i) \Delta P_{di}(\theta'_i)' + \phi_i'(\theta'_i) \Big|_{\theta'_i=\theta_i} = 0$$

$$\text{即: } \phi_i'(\theta_i) = -K_2 \Delta P_{di}(\theta_i) \quad (14)$$

两边对 θ 从 θ_i 到 θ_i^{\max} 积分, 得:

$$\phi_i(\theta_i^{\max}) - \phi_i(\theta_i) = -K_2 \int_{\theta_i}^{\theta_i^{\max}} \Delta P_{di}(\theta) d\theta \quad (15)$$

为了限制用户报高其类型, 虚报其缺电成本,

令 $\phi_i(\theta_i^{\max}) = 0$, 则:

$$\phi_i(\theta_i) = K_2 \int_{\theta_i}^{\theta_i^{\max}} \Delta P_{di}(\theta) d\theta \quad (16)$$

因此, 当用户上报类型为 θ'_i 时得到的信息补偿为:

$$\phi_i(\theta'_i) = K_2 \int_{\theta'_i}^{\theta_i^{\max}} \Delta P_{di}(\theta) d\theta \quad (17)$$

由式 (17) 可见, 用户得到的信息补偿与系统运营机构对用户类型的上限估计有关, 对用户信息越模糊, 用户得到的信息补偿越多。同时信息补偿与用户上报类型有关, 上报类型低于真实类型可得到较多信息补偿, 上报类型高于真实类型会使信息补偿减少。整个推导过程表明用户上报真实类型时获得利润最大。

因此, 系统运营机构支付给响应用户的补偿费用函数为:

$$\begin{aligned} \text{Compensation}_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) &= C_i(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i)) + \\ \phi_i(\theta'_i) &= K_1(\Delta P_{di})^2 + K_2 \theta'_i \Delta P_{di} + K_2 \int_{\theta'_i}^{\theta_i^{\max}} \Delta P_{di}(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (18)$$

4 计及需求侧响应的阻塞管理模型

需求侧响应资源参与阻塞管理时, 一方面由于用户削减需求, 系统运营机构会支付相应的补偿费用; 另一方面由于发电商减少出力, 系统运营机构支付的购电费用减少, 并且用户削减需求会导致发电商的经济剩余的转移, 因此系统运营机构也需要补偿发电商由于出力减少而招致的损失, 这部分损失用发电商的边际成本与出力减少量的乘积表示。根据这种思路, 我们构建计及需求侧响应的阻塞管

理模型。模型以针对发电商因减少出力而遭受的损失和用户因削减需求而遭受的损失, 系统运营机构所给予的补偿费用最小化为目标函数, 并且模型满足电力平衡约束、支路潮流约束、发电最大最小出力约束等。模型的表达式如下:

$$\begin{aligned} \min & \left[\sum_{j \in G} (MC_j \cdot \Delta P_{gj}^{\text{down}}) + \sum_{i \in D} (\text{Compensation}(\theta'_i, \Delta P_{di}(\theta'_i))) \right] \\ \text{s.t} & \\ \sum_{j \in Gn} P_{gj}^B - \Delta P_{Gn}^{\text{down}} - \sum_{i \in Dn} P_{di}^B + \Delta P_{Dn}(\theta'_i) - \sum_{m \in \Omega n} B_{nm}(\delta_n - \delta_m) &= 0 \\ \forall n = 1, \dots, N & \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} -P_{nm}^{\max} &\leq B_{nm}(\delta_n - \delta_m) \leq P_{nm}^{\max} \\ \forall n = 1, \dots, N, \forall m \in \Omega n & \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} u_j P_{gj}^{\min} &\leq P_{gj}^B - \Delta P_{gj}^{\text{down}} \leq u_j P_{gj}^{\max} \\ \forall j \in G & \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{Gn}^{\text{down}} &= \sum_{j \in Dn} \Delta P_{gj}^{\text{down}} \\ \forall n = 1, \dots, N & \end{aligned} \quad (22)$$

式 (19) 表示各条母线的电力负荷平衡约束, 其中 $\sum_{j \in Gn} P_{gj}^B$ 与 $\sum_{i \in Dn} P_{di}^B$ 分别表示需求侧响应前的总出力 and 总负荷, $B_{nm}(\delta_n - \delta_m)$ 表示通过支路 nm 的潮流; 式 (20) 表示支路 nm 的潮流约束; 式 (21) 表示发电商减少出力之后仍满足最大最小出力限制; 式 (22) 表示母线 n 的减少的总发电量等于该母线上所有发电商的出力减少量之和。目标函数表示系统运营机构支付给发电商和用户的补偿费用最小。

通过求解该模型, 能够得出需求侧参与阻塞管理的总成本。这部分成本比起新建输电线路或者对现有输电设备进行改造所要支付的成本低很多。并且输电扩容项目由于建设周期长、初始投资大以及电站选址和输电走廊占地等限制, 不能够在短期内有效缓解电力供应紧张的形势, 因此, 需求侧响应项目在一定程度上能够替代输电投资项目成为一种快捷、廉价、环保的短期输电阻塞管理方式。

5 结论

本文分析了需求侧响应项目参与阻塞管理对发电商和用户以及全社会的影响, 通过效益分析发现需求侧响应项目能够给未采取响应措施的用户创造“搭便车”的机会, 使他们享受到更低的电价。为了避免用户的投机行为, 需要构建合理的补偿费用机制以激励用户上报其真实的缺电成本。本文提出

了一种全新的考虑需求侧响应的输电阻塞管理模型,在模型中充分考虑了对发电商和用户的激励和补偿。模型能够有效地节约阻塞管理的成本,抑制用户的策略性行为。本文的研究验证了需求侧资源在缓解阻塞、迅速改善电力系统可靠性方面的潜力,在未来电力市场建设中应该充分发挥用户的积极性,引导合理的电力消费。

参考文献

- [1] 王弟, 黄志强, 陈庆兰. 需求响应在电力市场中的作用[J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(2): 171-174.
WANG Di, HUANG Zhi-qiang, CHEN Qing-lan. The Effect of Demand Response in Power Market[J]. Power DSM, 2007, 9(2): 171-174.
- [2] 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): 97-107.
ZHANG Qin, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Survey of Demand Response Research in Deregulated Electricity Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-107.
- [3] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of Demand Response and Advanced Metering: 2007 Staff Report[EB/OL]. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/09-07-demand-response.pdf>. 2007-09-13.
- [4] 郭磊. 电力产业需求侧管理与需求侧响应定价[J]. 价格理论与实践, 2007, 26(5): 33-34.
GUO Lei. Power Industry DSM and Demand Side Response Pricing[J]. Price Theory and Practice, 2007, 26(5): 33-34.
- [5] 郭大建. 开发电力需求侧资源, 努力实践科学发展观[EB/OL]. <http://www.hbds.com>. 2006-09-16.
GUO Da-jian. To Develop the Demand Side Resource and Realize the Concept of Scientific Development[EB/OL]. <http://www.hbds.com>. 2006-09-16.
- [6] Fereidoon Sioshansi, Ali Vojdani. What Could Possibly Be Better than Real-time Pricing? Demand Response[J]. The Electricity Journal, 2001(7): 1040-6190.
- [7] 张钦, 王锡凡, 王秀丽, 等. 需求侧实时电价下用户购电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 16-22.
ZHANG Qin, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, et al. Customer's Electricity Purchasing Risk Decision Integrating Demand Side Real-time Pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 16-22.
- [8] 周明华, 徐敏. 基于最优潮流的实时电价及其算法的研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 63-68.
ZHOU Ming-hua, XU Min. Researches on Spot Price Based on Optimal Power Flow and Its Algorithm[J]. Relay, 2006, 34(21): 63-68.
- [9] 李金波, 张少华. 考虑用户风险偏好的可中断负荷定价[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 52-57.
LI Jin-bo, ZHANG Shao-hua. Pricing of Interruptible Load Considering Risk Preference of Consumers[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 52-57.
- [10] 赵俏姿, 段献忠, 陈海焱. 批发竞争市场可中断负荷定价分析[J]. 华东电力, 2006, 34(3): 38-42.
ZHAO Qiao-zi, DUAN Xian-zhong, CHEN Hai-yan. Pricing of Interruptible Load for Wholesale Power Market[J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 38-42.
- [11] 鲁丽娟, 侯云鹤, 吴耀武, 等. 计及用户需求弹性影响的输电阻塞解决方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 46-50.
LU Li-juan, HOU Yun-he, WU Yao-wu, et al. A Research on Transmission Congestion Management Considering Influence of Consumers' Demand Elasticity[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 46-50.
- [12] 李才华, 杜松怀, 陈志文, 等. LMP 机制下可中断负荷用于阻塞管理的最优调度方法[J]. 继电器, 2008, 36(4): 67-72.
LI Cai-hua, DU Song-huai, CHEN Zhi-wen, et al. The Optimal Interruptible Load Dispatching Principle Based on LMP in Congestion Management[J]. Relay, 2008, 36(4): 67-72.
- [13] US Department of Energy. Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them: a Report to the United State Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005[EB/OL]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/congress_1252d.pdf. 2007-07-21.
- [14] Fahrioglu M, Alvarado F L. Designing Incentive Compatible Contracts for Effective Demand Management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1255-1260.
- [15] 李海英. 需求侧参与输电阻塞管理的模型与算法研究[D]. 上海: 上海大学, 2007.
LI Hai-ying. Research on Demand Side Based on Transmission Congestion Management Model and Algorithm[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2009-04-23

作者简介:

董军(1965-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为能源与电力经济; E-mail: dongjun624@126.com

张婧(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为输电投资与电力经济;

陈小良(1961-), 女, 博士研究生, 研究方向为电网规划与投资。