

公共楼宇群体价格型负荷响应的仿真分析方法研究

宁艺飞^{1,2}, 陈星莺², 谢俊², 余昆², 李作锋³, 陈振宇³, 马淑淑⁴

(1. 国网南京供电公司, 南京 210098; 2. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100;
3. 江苏省电力有限公司, 南京 210024; 4. 淮南供电公司, 安徽 淮南 232007)

Study on the method of simulation analysis for price based load response of public building

NING Yifei^{1,2}, CHEN Xingying², XIE Jun², YU Kun², LI Zuofeng³, CHEN Zhenyu³, MA Shushu⁴

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210098, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; Huainan Power Supply Company, Huainan 232007, China)

摘要:公共楼宇作为需求侧响应的主要参与者,因其复杂的响应机理而难以被电网公司、售电公司准确地调配使用。首先建立面向需求响应的楼宇照明系统、空调系统用户用电能耗模型;在此基础上,分别估算公共楼宇群体签订合同的人数和某次响应电价的整体功率;最后,在算例中对某一公共楼宇群体响应电价的曲线进行了仿真分析。结果表明,本文方法可以用于仿真公共楼宇群体响应价格型需求响应项目的特性。

关键词:价格型需求响应;公共楼宇;群体响应特性

Abstract: As the main participants in demand side response, public buildings are difficult to be properly deployed by power grid companies and electricity retail companies in case of its complicated response mechanism. The energy consumption models of building lighting system and air-conditioning system faced to demand response are established. On this basis, the number of contracts signed by public buildings and the overall power of a response are estimated respectively. Finally, an example is given to simulate the response of a group of public buildings. The results show that this method can be used to simulate the characters of public building groups responds to price based demand response projects.

Key words: price based demand response; public building; group response character

中图分类号:F407.61;TM714;TK018 文献标志码:A

0 引言

随着国际电力市场的逐步完善,价格型需求响应(PBDR)作为需求侧资源已被更多的市场主体所关注^[1]。如何站在售电公司或者电力公司的角度,设计价格需求响应下公共楼宇负荷的响应特性评估方法,从而较为准确地预估参与响应的楼宇数量和整体电量,成为电网公司和售电公司能否在相关项目中盈利的关键,并具有重要的学术意义和商业价值。

目前国内外对于价格型需求响应下公共楼宇的群体响应特性的研究较少,主要包含在2类论文中。第一类论文主要从经济学角度或者消费者心理学角度宏观地建立响应模型^[2-4]。其中,文献[2]利用多种函数形式描述用户电价响应的效用函数;文献[3]利用戴蒙德模型分析用户在高低电价下的响应行为;文献[4]利用消费者心理学函数反映用

户在电价高峰时段削减负荷、在电价低谷时段提高负荷的心理过程。这一类模型将价格需求这一经济模型描述清楚,模型简单,易于分析和计算。其缺点在于这一类模型往往只针对大电网进行建模,没有考虑某一类用户本身的用电特性。第二类论文主要从公共楼宇本身能耗特性出发建立楼宇响应模型^[5-8]。其中,文献[7]利用冷负荷模型分析中央空调响应电价的潜力;文献[8]通过分析空调在暂停时的室温变化过程,建立能耗-室温的动态响应过程。这一类方法不需要大量响应数据,也能根据用户的系统参数进行评价。其缺点在于这一类方法建模困难,数学模型复杂。

本文在公共楼宇本身能耗特性建模的基础上,建立面向需求响应的公共楼宇照明系统和空调系统用户用电能耗模型,得到单时段用户用电需求效用函数;通过结合行为心理学的前景理论研究,得到概率权重函数,以评估签订电价响应合同的用户人数;在此基础上,利用蒙特卡洛对用户用电能耗模型进行模拟求解,仿真分析群体用户响应实时电价的期望功率;最后,在算例中对群体用户响应特性进行了仿真。

收稿日期:2018-05-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901101);国家自然科学基金项目(51577051)

This work is supported by National Key R&D Program of China (NO.2016YFB0901101); National Natural Science Foundation of China (NO.51577051)

1 面向需求响应的公共楼宇负荷建模

公共楼宇负荷中占比最重、使用最为广泛的是照明和空调负荷。因此,本文分别建立照明负荷模型和空调负荷模型。

1.1 照明系统负荷建模

为保障人们舒适的工作环境,我们需要将工作环境中的光照保持在一个特定的范围之内,公共楼宇内部人工照明单位时间能耗量^[9]为

$$L_{\text{Light}} = \frac{[E_s(i) - \eta_e E_e(i)] S_{\text{all}}}{\phi UK} L_{\text{LS}} \quad (1)$$

式中: L_{Light} 为该时刻楼宇所需人工光源进行补充照明的功率; L_{LS} 为单个人工光源的功率; ϕ 为单个人工光源光通量; S_{all} 为需要照明的总面积; $E_s(i)$ 为室内综合照度值; $E_e(i)$ 为自然光的照度; η_e 为自然光利用系数,取0.4; U 为照明利用系数; K 为灯具维护系数,取0.8。

1.2 空调系统负荷建模

空调系统的建模一般分为3个部分:建筑物热力学模型,空调系统电-热转化模型和建筑物内室温状态转化模型。建筑物热力学模型主要包括3个部分:建筑物围护结构(房顶和墙窗)传入楼宇室内的热量、楼宇室内照明设施和人员散热产生的热量和新风系统持续不断换风产生的热量。

建筑物围护结构传入室内的热量 Q_b ^[10] 为

$$Q_b = (k_{\text{top}} S_{\text{top}} + k_{\text{wall}} S_{\text{wall}}) [T_{\text{out}}(i) - T_{\text{in}}(i)] - k_s S_{\text{wall}}^{\text{in}} T_{\text{in}}(i) \quad (2)$$

式中: k_{top} 为房顶热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; k_{wall} 为墙壁热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; S_{top} 、 S_{wall} 分别为屋顶、墙壁面积, m^2 ; $T_{\text{out}}(i)$ 、 $T_{\text{in}}(i)$ 为 i 时段室外、室内温度, $^\circ\text{C}$; k_s 为建筑物内墙面蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $S_{\text{wall}}^{\text{in}}$ 为内墙墙面面积。

室内照明与人员散热冷负荷^[10] 为

$$Q_{\text{hl}} = (k_p q_s + q_l) n_p S_c \alpha_h + k_l N_l S_c \quad (3)$$

式中: k_p 为人体散热冷负荷系数; q_s 、 q_l 为人体显热和潜热的散热负荷, W ; α 为人群集群系数; n_p 为单位面积人数; Q_{light} 为照明系统散热冷负荷, W ; k_l 为照明系统冷负荷系数; N_l 为照明系统单位面积散热量, W/m^2 ; S_c 为制冷区域面积, m^2 。新风冷负荷为

$$Q_{\text{new}} = \beta_{\text{new}} Q_{\text{bl}} \quad (4)$$

式中: Q_{new} 为新风冷负荷; β_{new} 为新风冷负荷系数^[10]。

空调系统电-热转化模型描述空调制冷/制热量与功率的定量关系,本文假定在某一时段内空调负荷与室内温度直接相关,不考虑短时间尺度的室温变化,根据文献[11],空调系统电-热转化模型为

$$Q_{\text{hv}} = \gamma \delta_{\text{cop}} P_{\text{HVAC}} \quad (5)$$

式中: Q_{hv} 为空调系统一个时段内的制冷量; δ_{cop} 为空调能效比; γ 为空调耗散系数; P_{HVAC} 为空调系统一个时段内需要设置的负荷功率。本文设定研究的最小时间尺度为1 h,即最短每1 h空调系统才会调整1次用电策略,所以本文后续的研究中有如下假设

$$L_{\text{HVAC}}(i) = P_{\text{HVAC}}(i) t \approx P_{\text{HVAC}}(i) \times 1 \quad (6)$$

式中: $L_{\text{HVAC}}(i)$ 为第 i 时段照明负荷总耗电量。

建筑物内室温状态转化模型用于描述当室内温度从上一时刻调整到当前时刻时,建筑楼宇所需的冷负荷量与上一时刻室内温度状态的关系^[11]

$$Q_{\text{js}} = 1.03576 S_b \bar{H}_b \rho_{\text{air}} [T_{\text{in}}(i-1) - T_{\text{in}}(i)] \quad (7)$$

式中: Q_{js} 为室内温度状态改变所需要的冷负荷; S_b 为楼宇建筑的总使用面积; $\bar{H}_b$ 为平均层高; ρ_{air} 为空气密度; $T_{\text{in}}(i-1)$ 为上一时刻的室内温度。

根据能量守恒原理,若希望楼宇维持在1个较为稳定的温度域,空调1 h的制冷量应等于消耗量,公共楼宇每1运行时段应该满足

$$Q_{\text{hv}} = Q_b + Q_{\text{hl}} + Q_{\text{new}} + Q_{\text{js}} \quad (8)$$

综上,HVAC系统用户用电能耗与设置温度、状态温度、人流量、建筑参数、空调参数的关系可以表示为

$$\begin{cases} Q_{\text{new}} = \beta_{\text{new}} (k_{\text{top}} S_{\text{top}} + k_{\text{wall}} S_{\text{wall}}) [T_{\text{out}}(i) - T_{\text{in}}(i)] \\ Q_{\text{hl}} = (k_p q_s + q_l) N_p S_c \alpha_h + r_{\text{light}} P_{\text{Light}}(i) \\ Q_b = (k_{\text{top}} S_{\text{top}} + k_{\text{wall}} S_{\text{wall}}) [T_{\text{out}}(i) - T_{\text{in}}(i)] - k_s S_{\text{wall}}^{\text{in}} T_{\text{in}}(i) \\ Q_{\text{js}} = 1.03576 S_b \bar{H}_b \rho_{\text{air}} [T_{\text{in}}(i-1) - T_{\text{in}}(i)] \\ L_{\text{HVAC}}(i) = (Q_b + Q_{\text{hl}} + Q_{\text{new}} + Q_{\text{js}}) / \gamma \delta_{\text{cop}} \end{cases} \quad (9)$$

2 价格型需求响应下楼宇用户群体响应分析

本文将评估价格型需求响应下楼宇用户的响应特性分解成2个问题:与售电商签订价格型需求响应合同的用户数以及在签订合同的前提下,一个公司大用户的单次响应量。这2个问题关系到电力公司和售电公司电网投资乃至市场报价策略,是售电公司和电力公司比较关心的基础模型问题。

2.1 基于前景理论的签订合同用户数函数

根据文献[9]和文献[11],日前市场中电价与气温和节假日的关系最大。为了简化研究,根据高温日(日最高温度大于35度)越多,电价相对越高这一原则,假设某区域高温日概率分布为向量 $HD = [P_1^{\text{temp}}, P_2^{\text{temp}}, \dots, P_n^{\text{temp}}]$,对应的区间中心值为向量 $CD = [C_1^{\text{temp}}, C_2^{\text{temp}}, \dots, C_n^{\text{temp}}]$,则年高温日数量期望应该为

$$E_{\text{hd}}(C) = [C_1^{\text{temp}}, C_2^{\text{temp}}, \dots, C_n^{\text{temp}}] \begin{bmatrix} P_1^{\text{temp}} \\ P_2^{\text{temp}} \\ \vdots \\ P_n^{\text{temp}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: C_n^{temp} 为该地区高温日数量分布在第 n 个区间内的中心值; p_n^{temp} 为该地区高温日数量分布在第 n 个区间内的概率。根据前景理论,用户习惯高估小概率事件,低估大概率事件,为了描述该特点,卡尼曼和沃特斯提出了一个区间 $[0,1]$ 上的权重函数,该函数在开区间 $(0,1)$ 上是连续且凸的。在 0 的邻域中该函数位于 45 度线之上,大部分范围则位于 45 度线之下。设定 $\pi(0) = 0$, $\pi(1) = 1$ 。该权重函数形式^[12]为

$$\pi_i(p) = \frac{p^{\eta_c}}{[p^{\eta_c} + (1-p)^{\eta_c}]^{1/\eta_c}} \quad (11)$$

式中: η_c 为决策者概率偏重系数, $\eta_c < 1$, 即小概率事件权重大于概率,大概率事件权重小于概率。根据卡尼曼和沃特斯的测定,取 $\eta_c = 0.61$ 比较符合人们的心理预期,此时,概率权重函数如图 1 所示。

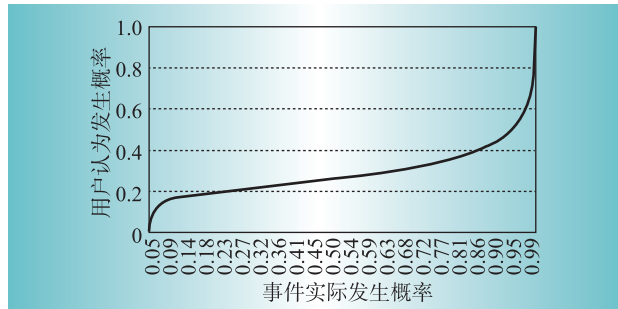


图 1 概率权重函数

Fig. 1 Probability weighting function

根据式(10)、式(11),用户对于年高温日数目的估计为

$$\hat{E}_{\text{hd}}(C) = [C_1^{\text{temp}}, C_2^{\text{temp}}, \dots, C_n^{\text{temp}}] \begin{bmatrix} \pi_1(p_1^{\text{temp}}) \\ \pi_2(p_2^{\text{temp}}) \\ \vdots \\ \pi_n(p_n^{\text{temp}}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

以图 2 中实时电价项目为例,假设电力公司与用户签订了夏季日(7月1日—9月30日)实时电价合同,根据高温日数在用户心中的估计,建立高峰日数量与用户心理支出的关系为

$$V_i = [N - \hat{E}_{\text{hd}}(C)] L_{\text{RTP}}^{\text{total}^T} \cdot p_{\text{normal}}^{\text{total}} + \hat{E}_{\text{hd}}(C) L_{\text{RTP}}^{\text{total}^T} \cdot p_{\text{top}}^{\text{total}} - N \cdot L_0^T \cdot p_0 \quad (13)$$

式中: N 为夏季日天数; $L_{\text{RTP}}^{\text{total}}$ 为楼宇负荷变化后每小时用电量(24点); $p_{\text{normal}}^{\text{total}}$ 为用户预估的平日电价(24点); $p_{\text{top}}^{\text{total}}$ 为用户预估的高温日电价(24点); L_0 为用户初始每小时用电量(24点); p_0 为用户用电初始电价(24点); V_i 为用户心理支出意愿。利用蒙特卡洛模拟法求出大致有多少楼宇的 $V_i < 0$, 从而计算出整体楼宇用户中有多少人拥有签订合同的意见。

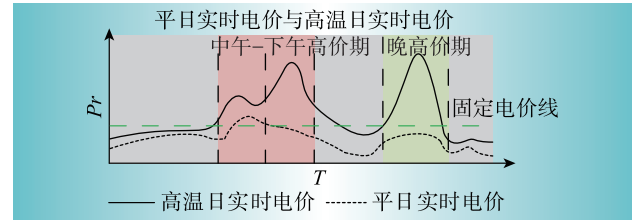


图 2 日实时电价对比

Fig. 2 Comparison of daily real-time price

2.2 价格-响应特性函数

在签订合同的人中,有些可能不愿意参与响应,有些可能响应量比较低,售电公司或电力公司为了制定合理的响应策略,需要建立价格-响应特性函数,为了达到这一目的,先研究单一用户情况下的用户响应量。

根据市场规律,在电价调整的前提下,用户调整自身用电量的多少取决于电价高低,而在同一价格调整的前提下,对于单体用户而言,用户响应量不固定,但必然服从某一分布。考虑到用户响应量有下限、无上限的特点,本文假设用户响应量满足负荷泊松分布,电价调整大小与泊松分布参数直接相关。设在某一价格下,用户调整温度的意愿和调整光照的意愿满足 Poisson 分布

$$P(T_{\text{just}} = k) = \frac{\lambda_1^k}{k!} e^{-\lambda_1} \quad (14)$$

$$P(E_{\text{just}} = k) = \frac{\lambda_2^k}{k!} e^{-\lambda_2} \quad (15)$$

假设这一时刻楼宇人流量满足正态分布 $N_p \sim N(\mu, \sigma)$, 设定这一时刻的室外温度和室内设置温度初始值,对式(1)进行蒙特卡洛模拟求解,计算出某一时刻楼宇负荷调整量的概率分布及其期望 E_{res} 。

当价格发生改变的时候,式(14)、式(15)中的参数 λ_1 、 λ_2 也将发生改变,设参数 $\lambda_1 = f_1(p_{\text{just}})$ 、 $\lambda_2 = f_2(p_{\text{just}})$, 其中 p_{just} 为价格改变量,表示电价变化前后的差值。

此外,用户响应的概率也有可能发生改变,根据中心极限定律,假设用户响应的可能性随价格的改变满足正态分布 $p_{\text{res}} \sim N(\mu_2, \sigma_2)$, 则响应人数与价格之间的关系可以用概率累计分布函数表示

$$V_{\text{res}} = Y_{\text{cons}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(p_{\text{just}} - P_z)^2}{2\sigma_2^2}} dt \quad (16)$$

式中: P_{just} 为价格调整; P_z 为价格调整中心点; σ_2 为用户响应分布参数; Y_{cons} 为签订合同用户的总数量。

在某一时刻用户整体响应函数

$$Y_{\text{res}} = E_{\text{res}} Y_{\text{cons}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(p_{\text{just}} - P_z)^2}{2\sigma_2^2}} dt \quad (17)$$

因此,本文整体计算流程如下:

(1) 利用用户设备的能耗特性,分别构建建筑

物HVAC系统参数模型和照明系统能耗模型;

(2) 统计用户数量、用户人流量分布情况、外部照度和室外温度,确定上一时刻室内温度;

(3) 统计用户响应不同价格下的温度和照度调整意愿,得到用户响应不同价格时的Poisson分布参数,统计用户响应数量随价格变化的分布情况;

(4) 确定实时电价的调整量,计算在该调整量下用户响应数量、温度和照度的调整分布参数;

(5) 将用户响应数量、温度、照度调整分布、用户人流量分布、室外温度和室内温度分别代入建筑能耗模型中,利用蒙特卡洛对公式(13)进行多次模拟,通过调整电价和模拟次数,计算用户响应期望;

(6) 改变电价调整量,重复(4)至(5)内容,直到遍历所有电价调整区间;

(7) 将输出(6)的计算结果,绘制电价调整-响应功率期望函数。

3 算例分析

某城市1957年至2010年平均高温日分布如图3所示。

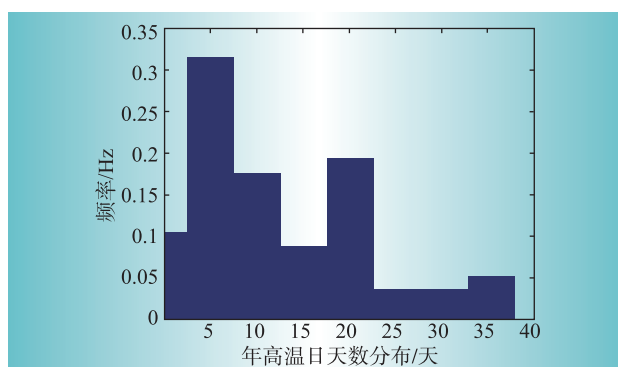


图3 某地区年平均高温日分布

Fig. 3 Annual average high temperature day distribution in a region

利用式(13)对图4进行计算,假设某电力公司有1000个大用户,若平日电价如表1所示,高温日电价如表2所示,可以得到1000个用户的价值期望如图5所示。

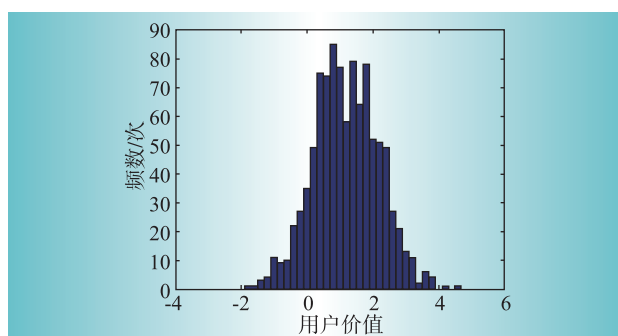


图4 1000个用户期望价值分布

Fig. 4 One thousand users expected value distribution

表1 某平日实时电价

Tab. 1 Real-time electricity price of a normal day

时段	实时电价	时段	实时电价	时段	实时电价
0	0.454	8	0.651	16	0.708
1	0.311	9	0.571	17	0.615
2	0.331	10	0.492	18	0.531
3	0.435	11	0.567	19	0.582
4	0.325	12	0.428	20	0.486
5	0.494	13	0.824	21	0.594
6	0.354	14	0.918	22	0.262
7	0.524	15	0.812	23	0.552

表2 某高温日实时电价

Tab. 2 Real-time electricity price of a high temperature day

时段	实时电价	时段	实时电价	时段	实时电价
0	0.504	8	0.826	16	1.578
1	0.347	9	0.74	17	1.167
2	0.384	10	0.923	18	0.907
3	0.505	11	1.188	19	0.95
4	0.377	12	1.385	20	1.169
5	0.573	13	1.677	21	0.941
6	0.643	14	1.804	22	0.847
7	0.625	15	2.188	23	0.637

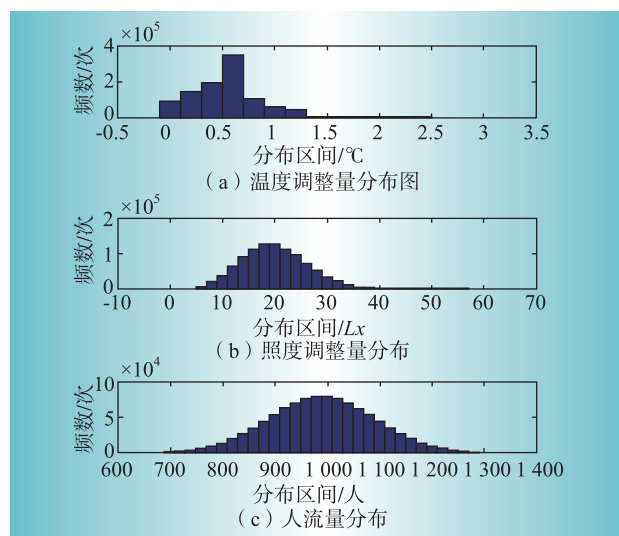


图5 不确定性输入量

Fig. 5 Uncertain inputs

可以得出,这1000个用户里有832名用户愿意签订实时电价协议,对这832名用户进行研究,假设某楼宇用户的人流量满足正态分布 $N_p \sim N(1000, 100)$,楼宇在某一时段的温度调整量和照度调整量满足Poisson分布

$$P(T_{\text{just}} = k) = \frac{4^k}{k!} e^{-4} \quad (18)$$

$$P(E_{\text{just}} = k) = \frac{10^k}{k!} e^{-10} \quad (19)$$

则人流量、照度调整量与温度调整量的分布如图5所示。

将这3个量带入式(1)和式(9),利用蒙特卡洛模拟进行100 000次模拟,可以得到单个楼宇的负荷响应量概率分布如图6所示。

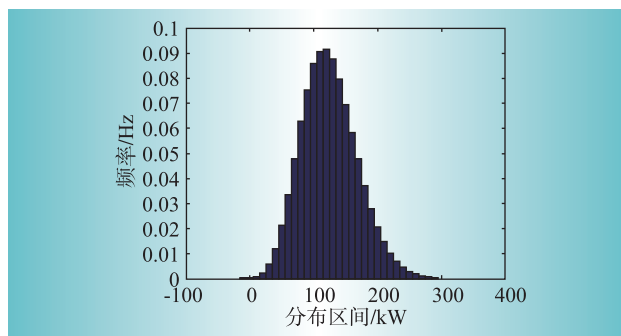


图6 功率调整值分布图

Fig. 6 Power regulation value distribution

计算该时段的负荷功率调整期望,得到该时段期望为124.66 kW。

在之前的计算中,1 000个用户中有832名用户签订了协议,设某地区经过统计,楼宇用户在不同电价差值下响应概率分布满足正态分布^[13] $p_{res} \sim N(0.2, 0.05)$,则用户响应概率和电价调整之间的关系如图7所示。

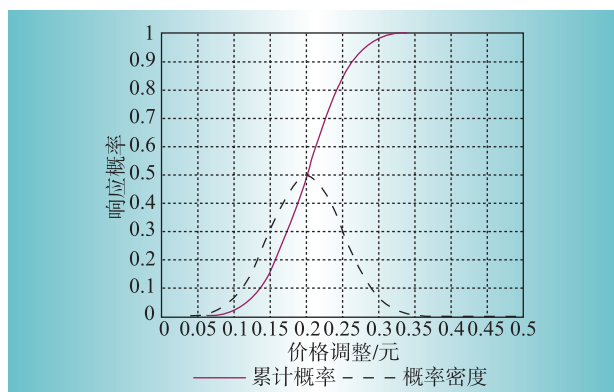


图7 用户响应概率和电价调整关系

Fig. 7 The relation between user response probability and electricity price adjustment

对分布进行修正,令 $\lambda_1 = 20p$, $\lambda_2 = 50p$,经过10 000次模拟,用户整体响应量与电价的关系如图8所示。

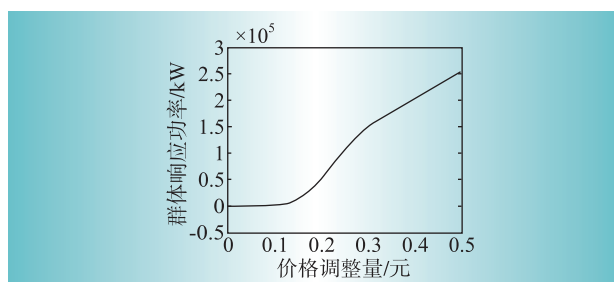


图8 用户整体响应量与电价的关系

Fig. 8 The relation between total response and electricity price

4 结束语

本文在价格型需求响应的背景下,建立了面向需求响应的公共楼宇照明系统和空调系统的用户用电能耗模型,并利用概率权重函数估算了用户在某一季度签订电价合同的效用值,从而评估了签订电价响应合同的用户人数。在此基础上,利用蒙特卡洛模拟,通过仿真用户的温度、照度调整意愿,得到了用户响应电价的概率分布和群体用户响应电价的期望功率。最后,在算例中对群体用户响应特性进行了仿真。结果表明,该模型能够仿真价格型需求响应下群体楼宇用户的响应特性,为之后的进一步研究提供了思路。

参考文献:

- [1] 王冬容. 激励型需求侧响应在美国的应用[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(1): 74-77.
WANG Dongrong. Application of incentive demand response in USA [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(1): 74-77.
- [2] RAHMANI - ANDEBILI M. Nonlinear demand response programs for residential customers with nonlinear behavioral models[J]. Energy and Buildings, 2016, 119(3): 352-362.
- [3] MOHAJERYAMI S, MOGHADDAM I N, DOOSTAN M, et al. A novel economic model for price-based demand response [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 135: 1-9.
- [4] 阮文骏, 王蓓蓓, 李扬, 等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术, 2012(7): 86-93.
RUAN Wenjun, WANG Beibei, LI Yang, et al. Customer response behavior in time-of-use price [J]. Power System Technology, 2012(7): 86-93.
- [5] BINA M T, AHMADI D. Stochastic modeling for the next day domestic demand response applications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2 880-2 893.
- [6] TRAN N, PHAM C, NGUYEN M, et al. Incentivizing energy reduction for emergency demand response in multi-tenant mixed - use buildings [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016(99): 1.
- [7] CHRISTANTONI D, OXIZIDIS S, FLYNN D, et al. Implementation of demand response strategies in a multi-purpose commercial building using a whole-building simulation model approach [J]. Energy and Buildings, 2016 (131): 76-86.
- [8] 彭堃. 公共楼宇日前用电负荷优化策略研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
PENG Kun. Public buildings before the electricity load optimization strategy research [D]. Nanjing: Hohai University, 2016.

(下转第51页)