

促进削峰填谷的居民实时积分套餐优化设计

陈璐¹,徐青山¹,杨永标¹,杨斌²

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210028)

摘要:在新一轮电力改革背景下,以积分为载体,提出了一种促进削峰填谷的居民实时积分套餐,初探电力销售端的居民侧市场化交易模式。首先,设计了促进削峰填谷的居民实时积分套餐机制,在用电低谷时段引入正积分鼓励居民多用电,在用电高峰时段利用负积分引导居民少用电,并基于消费者心理学,建立了基于实时积分套餐的居民负荷响应不确定性模型;然后,基于效用最大化原则,提出了兼顾电量峰谷差下降率和激励成本的居民实时积分套餐优化模型,并采用拉丁超立方采样方法和遗传算法相结合的方法进行求解;最后,设计了居民实时积分套餐实施架构及模式。算例结果表明,实时积分套餐能够很好地适应居民用电特点,激发居民群体的互动潜力,为居民参与电力市场交易提供支撑。

关键词:削峰填谷;实时积分;需求响应;价格激励;实施模式

中图分类号:TM 732;F 407.61

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202005006

0 引言

需求响应在竞争的电力市场中有着非常重要的地位,能够为电力系统可靠性的提升和电力市场便捷高效的运转给予关键性的支撑^[1-2]。居民负荷作为需求侧的重要组成部分,其具有资源分散、响应差异大且控制成本高的特点,但其用电时段集中、聚合潜力大,可通过价格、激励等机制引导其聚合后参与电网运行^[3]。在价格型项目方面,美国、法国等探索了以“能量球”、“价格灯”形式,应用信息展现及反馈技术鼓励居民跟踪分时或实时电价^[3],实施效果良好。受电力市场形态的影响,我国居民电价项目主要是以阶梯、分时电价^[4]或考虑区域资源的季节性电价^[5]为主,电价类型相对单一,对居民的引导潜力有限。在激励型项目方面,因存在居民数量众多、响应特性差异大、一对一通信成本高等问题,该类项目主要针对居民侧电网友好型设备开展示范应用^[6-7],如江苏开展了分散式空调响应试点^[8],规模小且成本高,尚未进入常态化、市场化运营阶段。

2015年3月,随着《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(简称9号文)的发布,我国开启了新一轮电力体制改革^[9]。9号文明确指出要通过合理的体制设计来推动电力销售端的市场化交易,构建市场化销售电价,充分发挥市场在配置电力资源中的作用。文献^[10]强调了建立面向电力需求侧主动

响应的商业模式和市场框架对电力市场运行的重要性。考虑到短期内激励机制难以完全放开,文献^[11]提出了电力积分的概念,构建了电力积分理论模型,详细阐述了电力积分激励机制的运营模式。文献^[12]面向有序用电场景,提出了基于电力积分的需求响应。文献^[13]引入积分思想,设计了基于储蓄机制的可中断负荷合同内容及实施流程。但上述研究中电力积分主要面向激励型项目,根据需求响应执行效果结算,离不开负荷基线和实际负荷的对比支撑,方案复杂,应用在居民侧时需与单个居民进行多次交互,推广难度大。为此,文献^[14]提出了以积分制为核心的电价型需求响应方案,通过在负荷高峰时段给予正积分、在负荷低谷时段给予负积分的机制来引导居民响应,但并未过多描述具体的应用方法,也未能考虑居民多样化响应特点。

2016年起,国网江苏省电力有限公司开展了国家重点研发计划“城区用户与电网供需友好互动系统”项目^[10,14-15],在苏州、常州2个地方示范应用110000户居民,探索海量居民与电网互动的多样化机制及效果,目前已完成110000户居民的硬件建设,具备与电网交互的能力,进入了互动机制探索阶段。本文基于该项目,设计了一种与现有电价政策并行的居民实时积分套餐机制,引导居民削峰填谷。

1 基于实时积分套餐的居民响应模型

1.1 实时积分套餐机制

电力积分的内涵是对用户响应行为进行信用累积,通过积分兑换的方式实现对用户的激励和利益反馈,兑换对象可以是一定的用电服务或者经济优惠^[11]。

本文以促进削峰填谷为目标设计了一种新型的居民实时积分套餐机制,其原理是在不影响现行电

收稿日期:2019-08-29;修回日期:2020-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901100);国家自然科学基金资助项目(51577028);东南大学卓越引智计划专项资金资助项目

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901100), the National Natural Science Foundation of China(51577028) and the Excellence Project Funds of Southeast University

价政策的基础上,在用电高峰时段对居民进行积分惩罚以减少居民在高峰时段的负荷量,在用电低谷对居民进行积分奖励来促进居民增加用电,实现峰荷向谷荷转移,达到削峰填谷的目的^[14]。全省典型负荷曲线与正负积分的关系如图 1 所示(图中负荷为标么值)。图中的负荷为 2018 年 8 月江苏全网负荷,峰时段为 11:00—17:00、20:00—22:00,平时段为 08:00—11:00、17:00—20:00、22:00—24:00,谷时段为 00:00—08:00。令峰时段为积分系数为负的惩罚时段,鼓励居民在此时段少用电;谷时段为积分系数为正的奖励时段,鼓励居民在此时段多用电。

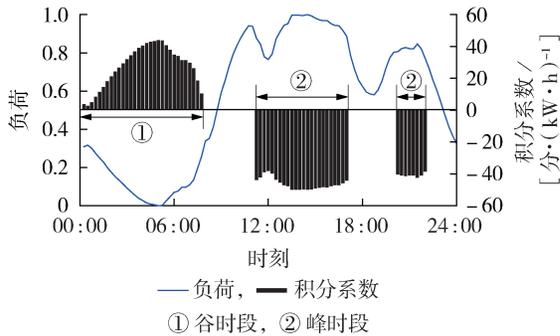


图 1 全省典型负荷曲线与正、负积分的关系

Fig.1 Relation between typical load curve of whole province and positive and negative scores

电网发布的积分模型如式(1)所示。

$$s(t) = \begin{cases} -\rho_f q^*(t) & t \in T_f \\ 0 & t \in T_p \\ \rho_g (\max \{q^*(t)\} - q^*(t)) & t \in T_g \end{cases} \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为 t 时段的积分系数; T_f 、 T_p 、 T_g 分别为峰、平、谷时段; $q^*(t)$ 为 t 时段的电网负荷标么值; ρ_f 、 ρ_g 分别为负、正积分基数。

那么,第 i 个居民在月结算周期 M 内获得的积分值 $S(i)$ 为:

$$S(i) = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T s(t) q(i, m, t) \quad (2)$$

其中, M 为结算天数; T 为时段数; $q(i, m, t)$ 为第 i 个居民在第 m 天 t 时段的用电量。

在推广初期,为了保障居民利益,对积分值为负的居民不进行结算或不实施惩罚,结算时负积分清零。那么,第 i 个居民的结算积分 $S_c(i)$ 为:

$$S_c(i) = \begin{cases} S(i) & S(i) \geq 0 \\ 0 & S(i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据积分-激励转换系数 k ,第 i 个居民可获得的激励 $D(i)$ 为:

$$D(i) = k S_c(i) \quad (4)$$

本文中的积分与传统的电价或激励具有等价效果,基于 k 将其换算成对应时段的激励水平,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{fp} = \bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_f = k \bar{s}_p - k \bar{s}_f \\ \lambda_{fg} = \bar{\lambda}_g - \bar{\lambda}_f = k \bar{s}_g - k \bar{s}_f \\ \lambda_{pg} = \bar{\lambda}_g - \bar{\lambda}_p = k \bar{s}_g - k \bar{s}_p \end{cases} \quad (5)$$

其中, λ_{fp} 、 λ_{fg} 、 λ_{pg} 分别为峰-平、峰-谷、平-谷时段的激励水平; $\bar{\lambda}_f$ 、 $\bar{\lambda}_p$ 、 $\bar{\lambda}_g$ 分别为峰、平、谷时段的平均激励水平; \bar{s}_f 、 \bar{s}_p 、 \bar{s}_g 分别为峰、平、谷时段的平均积分系数,其中 $\bar{s}_p = 0$ 。

1.2 基于实时积分套餐的居民不确定性响应模型

根据响应方式,居民负荷可分为以下 3 类:①不可控负荷,如照明、电视机,其开关将影响居民的正常生活;②可中断负荷,短时调整对居民生活的影响较小,如基于调温/关断策略的热水器或空调响应^[16];③可转移负荷,用电时间较为灵活,在某一时段内满足需求即可,如将电饭锅、热水器、热水壶、洗衣机、微波炉和洗碗机等的使用从高峰时段转移到低谷时段,但该类设备的使用具有一定的时间约束。本文假设响应行为不影响使用需求,即响应行为实施前、后的用电量保持不变,需求响应资源以可转移负荷为主。

居民用电需求与生活习惯息息相关,使用时间相对固定,具有很强的规律性,但同时受外界天气、生活规律、用户偏好等随机因素的影响很大,这些随机因素对响应能力的影响难以通过某一确定模型来表征,仅可以通过一个大致范围或概率分布来评估,居民电量的不确定性响应模型如式(6)所示。

$$\Delta q(\lambda) = \Delta q^m(\lambda) + \Delta q_{err} \quad (6)$$

其中, $\Delta q(\lambda)$ 为 t 时段激励水平 λ 下居民的实际响应量; $\Delta q^m(\lambda)$ 为 t 时段激励水平 λ 下居民响应的平均量; Δq_{err} 为 t 时段居民的随机响应量。

基于消费者心理学,引入激励-电量转移率关系,实施激励后,居民将电量从高价时段转移到低价时段。假设电量转移量与激励是成比例的,电量转移率曲线如图 2 所示。图中,响应度即为转移电量; λ_0 、 λ_1 、 λ_{max} 分别为启动、临界和饱和激励水平; Δq_{up} 、 Δq_{down} 分别为 t 时段居民响应量的上限、下限; $\Delta q_m(\lambda)$ 为不同激励水平 λ 下的预测电量响应量,如式(7)所示。

$$\Delta q_m(\lambda) = (\Delta q_{up}(\lambda) + \Delta q_{down}(\lambda))/2 \quad (7)$$

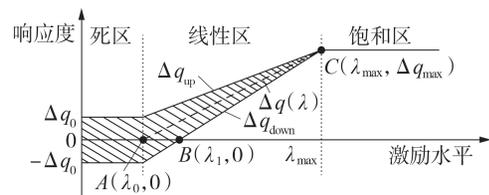


图 2 电量转移率曲线

Fig.2 Electric power transfer rate curve

考虑不确定性后,转移电量 $\Delta q(\lambda)$ 为:

$$\Delta q(\lambda) = \Delta q_m(\lambda) + \Delta q_{err} \quad (8)$$

其中, $\Delta q(\lambda)$ 为一个随机变量, 认为其在 $[\Delta q_{up}(\lambda), \Delta q_{down}(\lambda)]$ 范围内服从均值为 $\Delta q_m(\lambda)$ 的均匀分布。

假设转移电量平均分布在该时段内, 即总用电量保持不变:

$$q(t) = \begin{cases} q_f^0(t) - \Delta q_{fp}(\lambda_{fp})/\sigma_p - \Delta q_{fg}(\lambda_{fg})/\sigma_g & t \in T_f \\ q_p^0(t) + \Delta q_{fp}(\lambda_{fp})/\sigma_p - \Delta q_{pg}(\lambda_{pg})/\sigma_g & t \in T_p \\ q_g^0(t) + \Delta q_{fg}(\lambda_{fg})/\sigma_g + \Delta q_{pg}(\lambda_{pg})/\sigma_g & t \in T_g \end{cases} \quad (9)$$

其中, $q(t)$ 为 t 时段居民的实际用电量; σ_p 、 σ_g 分别为平、谷时段数; $q_f^0(t)$ 、 $q_p^0(t)$ 、 $q_g^0(t)$ 分别为峰、平、谷时段内 t 时段居民的初始电量; Δq_{fp} 、 Δq_{fg} 、 Δq_{pg} 分别为峰-平时段、峰-谷时段、平-谷时段的转移电量。

2 基于效用最大化的居民实时积分套餐优化

2.1 优化模型

对于电力公司而言, 实施实时积分套餐的目标是尽可能地促使居民将用电量从高峰时段转移到低谷时段, 日平均电量峰谷差率 r 如式(10)所示。

$$r = (Q_f - Q_g)/Q_f \quad (10)$$

$$Q_f = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_f} q(i, m, t)/M \quad (11)$$

$$Q_g = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{t \in T_g} q(i, m, t)/M \quad (12)$$

其中, Q_f 、 Q_g 分别为结算周期 M 内所有居民的日平均峰、谷电量; I 为居民用户数。

本文以峰谷差率下降率作为评估套餐实施效果的标准, 如式(13)所示。

$$\max f_1 = (r_b - r_a)/r_b \quad (13)$$

其中, r_b 、 r_a 分别为套餐实施前、后的日平均电量峰谷差率。

另一方面, 积分激励过高也会给电网带来成本压力, 积分激励成本尽可能地少也是电网目标之一, 如式(14)所示。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^I D(i) \quad (14)$$

那么, 基于效用最大化原则, 期望以最少的积分套餐激励获取最大的电量峰谷差率下降率, 效用函数为:

$$\max F = f_1/f_2 \quad (15)$$

约束条件包括以下3个。

(1) 积分均值约束。为了降低电网成本风险, 应确保电网总成本可控, 即居民积分均值处于某一区间。

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^I S_c(i)/I \leq \bar{S}_{\max} \quad (16)$$

其中, \bar{S} 为 I 个居民的结算积分均值; \bar{S}_{\max} 为电网允许的最大积分均值。

(2) 正负积分约束。为了提高居民认可度, 获取正负积分的居民比例应处于合理区间, 即:

$$\alpha = \sum_{i=1}^I N(S_+(i)) / \sum_{i=1}^I N(S_-(i)) \geq \alpha_{\min} \quad (17)$$

其中, $N(S_+(i))$ 为判断正积分数目的0-1函数, 若 $S(i) > 0$, 则 $N(S_+(i)) = 1$, 否则 $N(S_+(i)) = 0$; $N(S_-(i))$ 为判断负积分数目的0-1函数, 若 $S(i) < 0$, 则 $N(S_-(i)) = 1$, 否则 $N(S_-(i)) = 0$; α_{\min} 为最小正负积分比例。

(3) 最大积分倍数约束。为了防止居民之间“贫富差距”过大, 最大积分与积分均值的比值应满足一定的条件, 即:

$$\beta = \max \{ S(i) \} / \bar{S} \leq \beta_{\max} \quad (18)$$

其中, $\max \{ S(i) \}$ 为最大积分; β 为最大积分与积分均值的比值; β_{\max} 为最大积分倍数。

另外, 优化模型还包括式(1)~(9), 用于计算居民的响应电量。

2.2 求解流程

上述优化问题可以用一个非线性函数 $Y = f(X_1, X_2)$ 表示。其中, $Y = [\rho_f, \rho_g]$ 为模型输出变量; X_1 为确定性输入变量; $X_2 = [\Delta q_{fp}^{err}, \Delta q_{fg}^{err}, \Delta q_{pg}^{err}]$ 为不确定性输入变量, Δq_{fp}^{err} 、 Δq_{fg}^{err} 、 Δq_{pg}^{err} 分别为峰-平、峰-谷、平-谷时段的响应不确定性误差。

本文采用拉丁超立方采样法^[17]和遗传算法相结合的方法进行求解。拉丁超立方采样法主要解决响应不确定问题, 其采样原理就是通过分层采样使得样本点能够均匀地分布在变量的分布曲线上, 改善了蒙特卡洛采样由随机性所导致的分布不均匀、样本堆积的情况。具体求解步骤如下。

步骤1: 假设有 U 个居民, 那么有 $3U$ 个响应变量, 根据拉丁超立方采样法生成样本矩阵 R , 表示 U 个居民在3个时段的不确定性误差的 N 个采样值, 每个不确定性误差的 N 个采样值服从均匀分布。

步骤2: 随机生成包含多组 (ρ_f, ρ_g) 的染色体种群, 将每组染色体值分别代入效用函数 F 中, 分别计算 N 个不确定性误差的效用函数值, 求取平均值后得到该组 (ρ_f, ρ_g) 代表的效用函数值。

步骤3: 分别计算种群中多组 (ρ_f, ρ_g) 在 N 个不确定性误差样本下的效用函数值, 通过不断的交叉变异, 用效用函数值高的样本代替原来种群中效用函数值低的样本, 实现不断地优化, 最终从改善后的种群中挑选效用函数最大值及相应的 $(\rho_f^{\max}, \rho_g^{\max})$, $(\rho_f^{\max}, \rho_g^{\max})$ 作为实时积分套餐最优决策方案。

3 居民实时积分套餐实施模式

居民实时积分套餐的实施架构如附录A中图A1所示, 位于居民侧的非入户智能终端^[18]将辨识到

的居民电量数据(每15 min)上传给电力供需互动主站,主站经数据分析后,将积分数据信息推送给电力微信公众号“实时积分套餐”(以下简称“公众号”)模块。在推广初期,居民实时积分套餐是非强制的,有意愿的居民可通过登录“公众号”确认是否参与,若参与,则“公众号”定时向居民推送相关的积分规则、积分值、互动建议等信息,居民在收到信息后,可根据自身需求调整用电行为进行互动,实现闭环运行。具体实施流程如下。

(1)积分发布:“公众号”在每月的28日发布次月积分套餐,明确积分参数、计算、结算和兑换等规则。

(2)积分执行:按照积分计算规则,主站每日00:00时刻计算前日日的积分,“公众号”在每日的06:00时刻推送前一日居民单日及累计获取积分 $S(i)$,针对性地推送积分互动建议等,帮助居民调整用电方式以收获较高的激励,增强居民粘性。

(3)积分结算:每月的1—5日为上月积分核定期对,“公众号”于每月的6日主动将上月的结算积分 $S_c(i)$ 推送给居民,每月的6—15日为积分兑换有效期,居民按照 $k:1$ 获得激励 $D(i)$,具体可登陆国家电网网上商城进行实物或电费兑换。考虑到积分政策的灵活性及可变性,若居民未在兑换有效期内兑换,则“公众号”会在多次推送鼓励兑换信息后于16日的00:00时刻将积分清零。

(4)积分修正:在初期探索阶段,考虑到居民电量差异性大且难预测,可能出现积分值过小、用户参与度不高或者积分值过大、电网激励费用过高的情况。为了保证风险可控以及用户粘性,设置实时积分套餐有效期为1个月,允许实时积分按月更新,具体以每月28日发布的次月实时积分套餐为准,通过实施后的具体效果来拟合修正电力套餐以更好地满足电网和居民的需求。

4 算例分析

4.1 基础数据

2018年底,依托国家重点研发计划,国网江苏省电力有限公司已完成110000户居民互动软硬件建设,在居民侧安装了非入户智能终端,能够准确辨识每户每15 min的电量数据。本文选取2018年8月常州武进示范区10000户居民负荷30日的数据进行仿真。江苏全网负荷曲线如图1所示。

附录A中图A2为居民的日平均电量分布,由图可见60%的居民日平均电量小于 $10 \text{ kW}\cdot\text{h}$,若按统一电价 $0.52 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,月电费支出小于156元;居民的最大日电量为 $61.38 \text{ kW}\cdot\text{h}$,最大月电费支出为957.53元,最大月电费支出与月平均电费支出相差6倍。

根据前期工程经验、居民调研以及基于非入户智能终端的大数据分析,居民电量转移率如图2所示,参数设定如下: $\lambda_0 = 0.15 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\lambda_1 = 0.2 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\lambda_{\max} = 1 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\Delta q_{\max} = 0.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$, $\Delta q_0 = 0.15 \text{ kW}\cdot\text{h}$;考虑电网支出风险及居民认可度等影响,令 $\bar{S}_{\max} = 100 \text{ 分}$, $\alpha_{\min} = 9$, $\beta_{\max} = 18$, $k = 0.01 \text{ 元}/\text{分}$ 。

4.2 优化结果

当负、正积分基数分别为120、8.5分/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,得到最优实时积分套餐如附录A中图A3所示。由图可见,在谷时段,积分系数与负荷呈反比关系,负荷越小,积分系数越大,积分系数最大值发生在04:45—05:00,每 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 获得积分60.9分,谷、峰时段的积分系数均值分别为37.2、-11.5分/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$,按照100:1折算激励,峰-谷、峰-平、平-谷时段的激励分别为0.487、0.372、0.115元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

为方便理解,以下分析均选用日平均概念。图3为实时积分套餐实施前、后10000户居民的日平均电量曲线,实施实时积分套餐后居民的日总电量曲线趋于平滑,电量峰谷差明显减小。

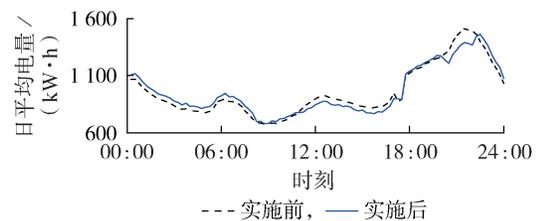


图3 实时积分套餐实施前、后居民日平均电量曲线
Fig.3 Average daily electricity consumption curves of residents before and after implementation of real-time score plan

表1给出了实时积分套餐实施前、后居民日平均日电量曲线指标。由表1可知,实时积分套餐实施后,日峰总电量下降了 $1701 \text{ kW}\cdot\text{h}$,为实施前日平均峰电量的5.23%;日平均谷电量增加了 $788 \text{ kW}\cdot\text{h}$,为实施前日平均谷电量的2.85%;日平均电量峰谷差率为6.81%,相比实施前下降了51.9%。需要注意的是,因居民用电高峰主要集中在17:00至次日02:00,与全网负荷曲线趋势并不一致,导致按照全网负荷曲线划分峰谷时段时,居民日电量峰谷差率维持在10%~20%。

表1 实时积分套餐实施前、后居民日平均电量曲线指标
Table 1 Indexes of average daily electricity consumption curve of residents before and after implementation of real-time score plan

是否实施套餐	峰总电量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	谷总电量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	峰谷差率/%
否	32261	27690	14.17
是	30560	28478	6.81

居民日平均积分分布如图4所示。由图可知,实时积分套餐实施后,正、负积分居民数分别为9 167、833户,正、负积分居民数的比例约为11;积分介于 $[0, 50)$ 分的居民数量最多,达到5 945户,占比59.45%;积分介于 $[50, 100)$ 分的居民数量次之,达到2 076户;积分介于 $[150, 200)$ 分的居民为463户;积分介于 $[-50, 0)$ 分的居民为762户;获得-50分以下积分的居民仅有71户,占比0.07%,数值很小。可见该套餐对绝大部分居民具有很好的激励作用,极端情况较少。

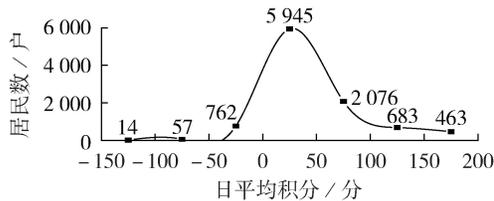


图4 居民日平均积分分布

Fig.4 Daily average score distribution of residents

同时,居民日平均最大、最小积分分别为797、-203分,日正积分均值为65.3分,即积分为正的居民平均每日获得0.65元积分激励,月平均积分激励为19.5元;电网日平均激励成本为5 985.1元,月激励成本为18.0万元。

关于约束参数对仿真结果的影响,附录B中重点对约束条件式(17)进行了趋势分析。

4.3 居民电量转移率影响分析

考虑到工程实际应用时,因政策、价格和技术敏感度等多因素影响,居民响应意愿较低^[19],优化时对电量转移率研究较为保守。

本文假设图2中死区响应阈值和最大响应量保持不变,按照 $\pm 10\%$ 缩减扩大电量转移率,即适当放大或减少居民响应度,运用实时积分套餐优化模型,计算最优套餐下实施效果。

表2为峰、谷积分系数均值随电量转移率变化的情况。由表可知,随着电量转移率增大,即居民响应能力增强,正、负积分系数均值变化趋势相反,正积分呈递增状态,负积分呈递减状态,变化幅度介于4%~10%之间。

表2 峰、谷积分系数均值随电量转移率的变化情况

Table 2 Change of mean peak and valley score coefficients with electricity consumption transfer rate

电量转移率 / %	峰积分系数均值 / $[\text{分} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	谷积分系数均值 / $[\text{分} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$
90	-35.8	10.5
100	-37.2	11.5
110	-41.0	12.0
120	-42.5	12.8

图5为电网侧指标随电量转移率的变化情况。由图可知,随着电量转移率的增大,电网日平均激励

成本开始增大,但增幅不大,约3%,但日平均电量峰谷差率下降更加明显,从电量转移率为90%时的8.50%下降至电量转移率为120%时的5.13%。

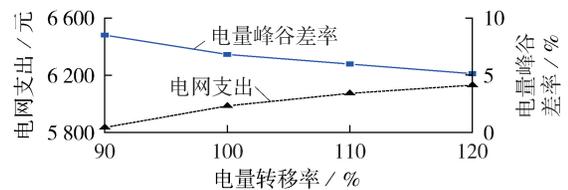


图5 电网侧指标随电量转移率的变化关系

Fig.5 Change relationship of power grid side index vs. electricity consumption transfer rate

表3为居民日平均积分数值随电量转移率的变化情况。由表可知,随着电量转移率的增大,最大和最小正积分都呈增大趋势,正、负积分居民数之比逐渐增长,即获得正积分的居民越来越多,获得负积分的居民越来越少;但是,积分均值在电量转移率高于100%后呈缓慢下降趋势,从电量转移率为100%时的65.3分下降至电量转移率为120%时的64.3分,可见,随着电量转移率的增加,可获激励的居民总数增加的同时,单个居民可获得的激励出现下降。

表3 日平均积分随电量转移率的变化关系

Table 3 Change relationship of mean daily score vs. electricity consumption transfer rate

电量转移率 / %	最大积分 / 分	最小积分 / 分	正积分均值 / 分	正、负积分居民数之比
90	793.46	-226.85	64.6	9.4
100	797.33	-202.96	65.3	11.0
110	803.14	-167.12	64.9	14.7
120	813.29	-131.28	64.3	20.5

经分析可发现,电量转移率的增大进一步激发了居民的响应能力,为了达到最优套餐,正、负积分系数均值进一步拉大;同时,电量转移率的增大进一步加剧了居民之间的竞争,使得电网激励成本变化不大的前提下,单个居民可获得的激励出现下降,可获激励的居民数增加。这也间接地验证了居民参与市场的能力越强,越有利于带来竞争的市场环境,增强市场活力,形成电网-用户双赢的局面。

5 结论

本文提出了一种与已有的电价政策并行的居民实时积分套餐机制,以正负积分激励的形式引导居民在峰时段少用电、在谷时段多用电;并基于效用最大化原则,提出了兼顾电量峰谷差下降率和激励成本的居民实时积分套餐优化模型,设计了考虑修正的居民实时积分套餐的实施架构及模式。算例结果表明,所提积分套餐是在不影响现行政策的前提下对多样化机制的进一步探索,有效调动了居民的响应积极性,有助于了解居民响应敏感度和能力,契合

我国新一轮电力体制的改革目标。

进一步地,笔者将依托示范工程,逐步开展面向110000户居民的实时积分套餐示范应用,对居民响应能力进行深入分析,进一步收集居民响应敏感度数据,修正居民电量转移率模型,弥补对居民潜力分析的不足,发展多样化、定制化的积分套餐,以更好地贴合不同的居民负荷特性,有效引导居民主动参与电网运行,支撑电力销售端的居民侧市场化交易。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郝勇生,王培红,高赐威,等. 基于大用户能效的电网需求响应机制[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):44-49.
HAO Yongsheng, WANG Peihong, GAO Ciwei, et al. Demand response mechanism of power grid based on energy efficiency of large user[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):44-49.
- [2] 赵洪山,赵航宇,侯杰群,等. 需求响应配电网供电可靠性影响分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):8-14.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu, HOU Jiequn, et al. Effect of demand response on supply reliability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):8-14.
- [3] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3654-3663.
WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22):3654-3663.
- [4] 董军,张晓虎,李春雪,等. 自动需求响应背景下考虑用户满意度的分时电价最优制定策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):67-73.
DONG Jun, ZHANG Xiaohu, LI Chunxue, et al. Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):67-73.
- [5] 张钦,王锡凡,王建学,等. 丰枯季节电价决策模型分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(24):7-11,15.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Decision model analysis of season-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24):7-11, 15.
- [6] 廖正海,李利娟,刘红良,等. 电网友好型多用电设备协调控制模型与策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):208-214.
LIAO Zhenghai, LI Lijuan, LIU Hongliang, et al. Coordinated control model and strategy for grid friendly multi-household applications[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):208-214.
- [7] 孙毅,陈一童,李彬,等. 计及用户舒适性与公平性的热泵负荷集群控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):122-128.
SUN Yi, CHEN Yitong, LI Bin, et al. Heat pump load aggregated control strategy considering comfort and fairness of customers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):122-128.
- [8] 李作锋,陈振宇. 江苏电力需求响应的探索和实践[J]. 电力需求侧管理,2018,20(1):4-8.
LI Zuofeng, CHEN Zhenyu. The exploration and practice of Jiangsu power demand response[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):4-8.
- [9] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见

(中发〔2015〕9号)[EB/OL]. (2017-02-15)[2019-08-02].
<http://www.ne21.com/news/show-64828.html>.

- [10] 丁一,惠红勋,林振智,等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化,2017,41(14):2-9,189.
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):2-9, 189.
- [11] 陈璐,杨永标,姚建国,等. 基于电力积分的需求响应激励机制设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(18):82-87.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, YAO Jianguo, et al. Incentive mechanism design for demand response based on power score[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18):82-87.
- [12] 王蓓蓓,孙宇军,李扬. 不确定性需求响应建模在电力积分激励决策中的应用[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):93-99,150.
WANG Beibei, SUN Yujun, LI Yang. Application of uncertain demand response modeling in power-score incentive decision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10):93-99, 150.
- [13] 徐青山,刘梦佳,戴蔚莺,等. 计及用户响应不确定性的可中断负荷储蓄机制[J]. 电工技术学报,2019,34(15):3198-3208.
XU Qingshan, LIU Mengjia, DAI Weiyang, et al. Interruptible load based on deposit mechanism considering uncertainty of customer behavior[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15):3198-3208.
- [14] 谢康,张凯杰,栾开宁,等. 电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索[J]. 电力需求侧管理,2019,21(3):7-10.
XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):7-10.
- [15] HUI H X, JIANG X, DING Y, et al. Demonstration of friendly interactive grid under the background of electricity market reform in China[C]//2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). Milan, Italy: IEEE, 2017: 1-5.
- [16] 徐青山,吴泉,杨斌. 考虑状态差异性聚类的空调负荷直接负荷控制动态优化方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):33-42.
XU Qingshan, WU Xiao, YANG Bin. Dynamic optimization method of direct load control for air-conditioning load considering status diversity clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):33-42.
- [17] 邓士伟,傅萌,苗青,等. 一种非入户智能终端相别配置装置:CN208013297U[P]. 2018-10-26.
- [18] 蔡珑,顾洁,金之俭. 居民用户需求响应行为影响因素辨识与响应特性提取[J]. 电网技术,2017,41(7):2378-2385.
CAI Long, GU Jie, JIN Zhijian. Study on factor identification and feature extraction of residential demand response behavior[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2378-2385.

作者简介:



陈璐

陈璐(1987—),女,江苏溧阳人,博士研究生,主要研究方向为综合能源与需求响应(E-mail:230189823@seu.edu.cn);

徐青山(1979—),男,江苏泰州人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能配电系统与微网(E-mail:xuqingshan@seu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimization design of residents' real-time score plan for promoting peak-load shifting

CHEN Lu¹, XU Qingshan¹, YANG Yongbiao¹, YANG Bin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210028, China)

Abstract: Under the background of a new round of electricity market reform, a residents' real-time score plan for promoting peak-load shifting is put forward to make preliminary discussion on the residential side market trading mode of electricity sales. Firstly, the mechanism of residents' real-time score plan is designed to promote peak-load shifting. In the valley-load periods, positive scores are introduced to encourage residents to use more electricity, while in the peak-load periods, negative scores are used to guide residents to use less electricity. On the basis of consumer psychology, the uncertainty model of residential load response based on the real-time score plan is established. Then, based on the principle of utility maximization, the optimization model of residents' real-time score plan is proposed, which takes both the decreasing rate of peak-valley electricity difference and incentive cost into account, and is solved by the combination method of Latin hypercube sampling method and genetic algorithm. Finally, the implementation architecture and mode of the proposed real-time score plan are designed. The example results show that the real-time score plan can adapt to the electricity consumption characteristics of residents well, and stimulate the interactive potential of resident community, providing support for residents to participate in the electricity market transactions in the future.

Key words: peak-load shifting; real-time score; demand response; price incentive; implementation mode

(上接第133页 continued from page 133)

Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load

LI Junhui¹, ZHANG Jiahui¹, MU Gang¹, GE Yanfeng², YAN Gangui¹, SHI Songjie³

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110006, China;

3. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110003, China)

Abstract: In order to achieve the optimal peak load shifting effect of energy storage system, a day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load is proposed. According to the load curve of the scheduling day, the highest valley filling power line and the lowest peak clipping power line that can be achieved during the peak regulation process and the corresponding charging and discharging energy are calculated respectively with the rated capacity and rated power of energy storage system as the constraints. According to the required charging and discharging energy difference, the charging and discharging power of the energy storage system at each moment is determined aiming at the optimization of the energy storage system economy and the load peak-valley difference improvement within the non-operation range of energy storage system, so as to achieve the balance between charging and discharging energy. The valley filling scheduling model, peak clipping scheduling model and energy balance scheduling model are established respectively, and the corresponding scheduling strategy execution process is developed. The evaluation indexes of scheduling strategy are constructed to verify the effectiveness of the proposed dispatching strategy based on the load and wind power data of a power grid.

Key words: energy storage; peak load shifting; load characteristics; economy; optimal scheduling

附录 A

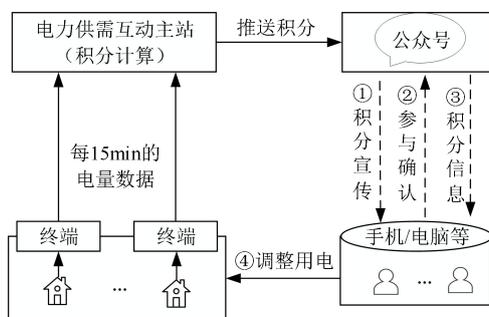


图 A1 居民实时积分套餐实施架构

Fig.A1 Implementation architecture of real-time score plan for residents

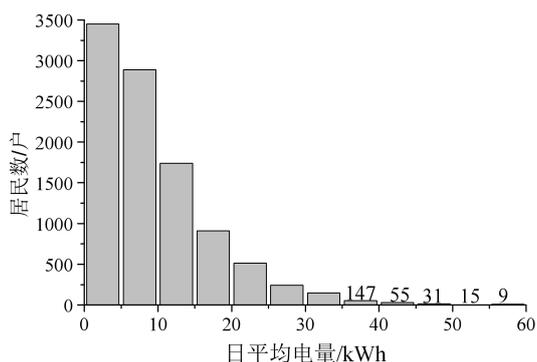


图 A2 居民日平均电量分布

Fig.A2 Average daily electricity consumption distribution of residents

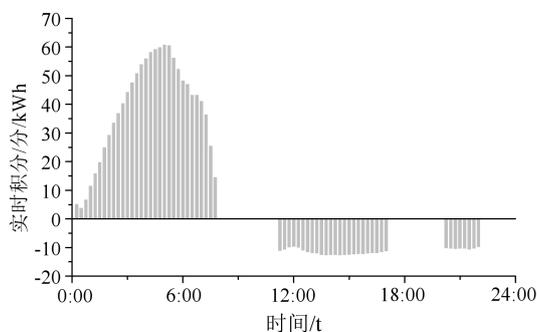


图 A3 实时积分套餐

Fig.A3 Real-time score plan

附录 B

研究约束条件中参数变化对仿真结果的影响, 不难发现约束条件式(16)–(18)均与 $S(i)$ 和 $S_c(i)$ 正相关, 这使得积分均值、正负积分比例和最大积分倍数三者呈正比变化。考虑到上述约束变化的联动性和一致性, 此处重点分析最小正负积分比例 α_{\min} 的变化对优化结果的影响, 令 α_{\min} 分别为 5、9 和 13, 结果如表 B1 所示。由表可见, 随着 α_{\min} 逐渐增加, 获得正积分的居民越来越多, 最大和最小正积分都呈增大趋势, 正积分均值增加, 给电网带来的激励成本增加。

表 B1 日平均积分随最小正负积分比例约束变化

Table B1 Daily average score with the minimum ratio constraint of positive and negative score

α_{\min}	最大积分/分	最小积分/分	正积分均值/分	正、负积分居民数之比
5	772.16	-358.33	52.9	5.7
9	797.33	-202.96	65.3	11.0
13	820.35	-90.45	71.4	13.9