

用户需求响应活动特性的精细化研究

用户的需求侧响应是电力需求侧管理中的一项重要内容，对用户需求响应活动的参与实体及实体的主要活动进行分析，提出用户需求响应活动的负荷优化响应模型，给出其响应目标函数及其约束条件；然后对峰谷分时电价激励下的用户需求响应活动的响应收益与负荷消减效果进行分析，给出用户需求响应活动优化方程的求解方法。通过分析实例的计算结果表明，实施需求响应不但能够消减电网尖、峰时段的用电负荷，填充谷时段的用电负荷，而且还可以在一定程度上减少用户的电费支出。

马永武 黄明山 李如意/河南许继仪表有限公司
赵国生/郑州大学电气工程学院



马永武/工程师

用户的需求侧响应是电力需求侧管理中的一项重要内容，它是指电力用户根据供电部门制定的电价信息和激励信息来调整自己的用电计划，并调整其用电负荷曲线，以达到在满足用户满意度条件下的用户电费支出最小化目标所采取的用电手段及用电方式。

电力用户为了实现最小化电费支出的目标，通常利用用户响应手段寻优的方法来实现，用户的响应手段包括采用电力储能技术、电力负荷管理技术、先进的节电技术以及合理安排用电时间等方式。

电力用户的需求侧响应通过将一部分高峰负荷转移到低谷时段使用，可以实现电网负荷的消峰填谷，从而实现均衡用电、均衡发电，减少为了满足边际容量需求的发电设备投资及输电设备投资。这样不仅可以提高终端的用电效

率、优化用电方式，还可以减少电力资源的浪费，并提高电网运行的经济性和可靠性，从而使电力产生最大的社会效益和经济效益。

本文通过对用户需求响应活动的参与实体及实体的主要活动进行分析，提出用户需求响应活动的负荷优化响应模型，并通过分析实例的计算结果证明该响应的有效性和实用性。

用户需求响应的参与实体及作用

由于在电力市场的运作机制下，规模较小的消费者不允许直接参与趸售计划，因此只有一些规模比较大的消费者才能削减和转移他们其中一部分用电量或者是在电力趸售市场进行用电需求和电力价格的招标。小规模消费者只能通过整合负荷服务商（整合商）在电力市场进行注册。这样就出现了一系列的需求响应参与实体，以对小规模的电力消费用户进行整合服务，这些整合商通过与电力用户签订需求响应服务条款，将其顾客联合在一起形成一个独立的购电单位，同电力零售商商讨购买电力的问题，同时整合商也代表它的顾客同电力零售商、配电公司和输电公司来商讨需求反应。

需求响应活动的参与主体及其主要市场活动如表1所示。

用户需求响应活动的负荷优化响应模型

考虑用户的能量储存容量情况，用户的负荷优化响应模型的目标函数为

关键词/Keywords

负荷响应模型·
需求响应·
响应实体·
分时电价·

国家自然科学基金资助项目（51307152）。

表1 主要市场主体及活动

市场主体	市场活动
消费者	购电自用, 终端用户
负荷服务机构	给批发市场用户和终端用户提供电力服务, 包括零售商
零售商	卖电给消费者, 自身不拥有或控制发电资产
销售商	对电拥有所有权并相消费者转售电
集成服务商	为众多的购电者和/或售电者处理计划、进度、财务、账单以及结算事宜
经纪人	作为别人在商谈合同、购买、销售电力或电力服务活动的代理, 本身不拥有所有权
最后服务提供商	为不行使零售选择权的用户提供默认服务
缩减服务提供商	为需求侧响应项目整合用户资源
公用配电公司	拥有和维护配电系统, 配送电力, 又称为配电服务提供商及地方配电公司
发电商	拥有或掌握发电资源并生产电力
公共电力公司	提供发电、输电、配电、缩减负荷服务和计量等多方面
独立系统运营机构	输电网运营机构, 提供无歧视准入、管理阻塞、维持电网可靠性和安全性、提供账单和结算服务
区域输电组织	输电网所有者和使用者联盟, 负责向FERC汇报输电系统开放准入的执行情况。也叫区域蜀电集团RTG
电力交易中心	管理电能及负荷竞价, 包括需求侧响应, 执行双边物理合同外的其他交易
计划协调机构	履行一定容量以上合同双方的交易执行和结算, 计划合同执行起始时间以及有关电力供应和接受的其他有关事项
计量服务商	安装和维护计量设备
计量数据管理代理	读取和核对计量数据信息

$$\Delta C_{\text{opt}} = \min \left[pW - \sum_{k=1}^N p_k \Delta W_k \right] \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} T_{\text{set}} \leq T_{\text{max-cold}} \\ T_{\text{set}} \geq T_{\text{min-hot}} \\ E_{\text{bus}} \geq E_{\text{min}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ΔC_{opt} 为优化减少的电费支出; k 为电价变化期序列; N 为电价变化期总数; p_k 为 k 时段的电价; ΔW_k 为 k 时段减少的电能消费量; p 为分时电价实施前的单一电价; W 为分时电价实施前的用户用电量。

工业用户应满足企业生产的工序约束条件和生产时间约束条件, 具体如下:

工序约束条件

$$TS_{ijk} \geq TS_{i(j-1)k} + P_{i(j-1)k} \quad (2)$$

生产时间约束条件

$$\Delta T \geq \sum_{k=1}^N TS_k \quad (3)$$

式中, TS_{ijk} 为工序 j 在第 k 台设备上的加工开始时间; P_{ijk} 为工序 j 在第 k 台设备上的加工时间; ΔT 为企业每天的生产时间; TS_k 为每道生产工序的生产时间; N 为每天总的生产工序数。

居民、公共机构和商业用户的约束条件为感觉舒适度约束, 可以用温度和光照度两个约束条件来表示, 即

式中, T_{set} 为用户的制冷空调系统或取暖设备的设定温度; $T_{\text{max-cold}}$ 、 $T_{\text{min-hot}}$ 分别为空调系统制冷和制热时满足客户舒适度要求的室内温度最大值与最小值; E_{bus} 为室内的光照度, lx; E_{min} 为保证用户满意光照度的最小值。

用户的需求响应活动效果分析

1. 峰谷分时电价下的用户响应收益及负荷消减效果

在需求响应活动中, 通常采用电价激励的措施来调节用户的响应行为, 电力用户对价格的响应行为有中断用电、转移用电、替代能源、能量存储和减少负荷五种方式, 假设采用的峰谷分时电价政策降电价分为四个时间段: 尖电价时段电价为 p_j 元/kW·h; 峰电价时段电价为 p_p 元/kW·h; 平电价时段电价为 p_p 元/kW·h; 谷电价时段电价为 p_g 元/kW·h。对于商业用户与高耗能企业用户各个时段的电价与居民用户、公共机构各个时段电价是不同的。

对于某一用户, 假定其能够参与需求响应活动的设备数量为 N 个, 在该设备能够参与需求响应活动的各个不同电价用电时间段中, 用户需求响应活动可减少的电费支出为

$$\Delta C = \sum_{i=1}^N (p_j \Delta W_j^i + p_f \Delta W_f^i + p_p \Delta W_p^i + p_g \Delta W_g^i) \quad (5)$$

式中, ΔW_j^i 、 ΔW_f^i 、 ΔW_p^i 和 ΔW_g^i 分别为尖、峰、平和谷时间段用户的第 i 个响应设备的节电量。

它们的表达式分别为

$$\Delta W_j^i = \Delta W_{j,zd}^i + \Delta W_{j,zf}^i + \Delta W_{j,zp}^i + \Delta W_{j,zg}^i + \Delta W_{j,cn}^i + \Delta W_{j,td}^i + \Delta W_{j,nx}^i \quad (6)$$

$$\Delta W_f^i = \Delta W_{f,zd}^i - \Delta W_{f,zf}^i + \Delta W_{f,zp}^i + \Delta W_{f,zg}^i + \Delta W_{f,cn}^i + \Delta W_{f,td}^i + \Delta W_{f,nx}^i \quad (7)$$

$$\Delta W_p^i = \Delta W_{p,zd}^i - \Delta W_{p,zf}^i - \Delta W_{p,zp}^i + \Delta W_{p,zg}^i + \Delta W_{p,cn}^i - \Delta W_{p,td}^i + \Delta W_{p,nx}^i \quad (8)$$

$$\Delta W_g^i = \Delta W_{g,zd}^i - \Delta W_{g,zf}^i - \Delta W_{g,zp}^i - \Delta W_{g,zg}^i - \Delta W_{g,cn}^i + \Delta W_{g,td}^i + \Delta W_{g,nx}^i \quad (9)$$

用户参与需求响应活动的各个电价时段的负荷消减情况具体如下:

用户尖电价时段的负荷降峰比为

$$\eta_j = \sum_{i=1}^N (\Delta W_j^i) / W_j \quad (10)$$

用户峰电价时段的负荷降峰比为

$$\eta_f = \sum_{i=1}^N (\Delta W_f^i) / W_f \quad (11)$$

用户平电价时段的负荷变比为

$$\eta_p = \sum_{i=1}^N (\Delta W_p^i) / W_p \quad (12)$$

用户谷电价时段的负荷变比为

$$\eta_g = \sum_{i=1}^N (\Delta W_g^i) / W_g \quad (13)$$

式中, W_j 为尖电价时间段的用户总用电量; W_f 为峰电价时间段的用户总用电量; W_p 为平电价时间段的用户总用电量; W_g 为谷电价时间段的用户总用电量。

2. 用户需求响应活动优化方程的求解

在峰谷分时电价政策引导下, 用户需求响应活动的每个电价时段的节电量是用户在其约束条件制约下根据电价信息作出的反应, 即 ΔW_j^i 、

ΔW_f^i 、 ΔW_p^i 和 ΔW_g^i 中的每个量都是四个时段的电价信息的函数, 这样用户负荷优化响应的目标函数的电价信息表达式为

$$\Delta C_{\text{opt}} = \min f(p, p_j, p_f, p_p, p_g) = \min f(\mathbf{p}) \quad (14)$$

根据用户的负荷优化响应模型及其约束条件建立拉格朗日方程为

$$L_1(\mathbf{p}, \lambda, \tau_1, \tau_2) = f(\mathbf{p}) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \lambda (TS_{ijk} - TS_{i(j-1)k} + P_{i(j-1)k}) + \lambda_1 (\Delta T - \sum_{k=1}^N TS_k) + \tau_1 (T_{\text{set}} - T_{\text{max-cold}}) + \tau_2 (T_{\text{set}} - T_{\text{min-hot}}) + \tau_3 (E_{\text{bus}} - E_{\text{min}}) \quad (15)$$

式中, $\lambda \leq 0$; $\lambda_1 \leq 0$; $\tau_2 \leq 0$; $\tau_3 \leq 0$; $\tau_1 \geq 0$ 。

按照Karush-Kuhn-Tucker最优化条件, 式(15)的最优点 $\mathbf{p}$ 必须满足下面的条件

$$L_1(\mathbf{p}, \lambda, \tau_1, \tau_2) = \nabla f(\mathbf{p}) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \lambda \nabla (TS_{ijk} - TS_{i(j-1)k} + P_{i(j-1)k}) + \lambda_1 \nabla (\Delta T - \sum_{k=1}^N TS_k) + \tau_1 \nabla (T_{\text{set}} - T_{\text{max-cold}}) + \tau_2 \nabla (T_{\text{set}} - T_{\text{min-hot}}) + \tau_3 \nabla (E_{\text{bus}} - E_{\text{min}}) \quad (16)$$

可以采用内点法对该约束优化问题进行求解, 其迭代格式为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{p}}_{k+1} &= \bar{\mathbf{p}}_k + \alpha_k \bar{\mathbf{d}}_k \\ \lambda_{k+1} &= \lambda_k + \beta \Delta \lambda_k \\ \lambda_{1,k+1} &= \lambda_{1,k} + \beta_1 \Delta \lambda_{1k} \\ \tau_{2,k+1} &= \tau_{2,k} + \beta_2 \Delta \tau_{2k} \\ \tau_{3,k+1} &= \tau_{3,k} + \beta_3 \Delta \tau_{3k} \\ \tau_{1,k+1} &= \tau_{1,k} + \gamma \Delta \tau_{1k} \end{aligned} \quad (17)$$

式中, α_k 、 β 、 β_1 、 β_2 、 β_3 和 γ 为步长因子, 取决于所选用的搜索方法, 在进行搜索时具有方向性, γ 变量搜索方向与其他变量相反。

计算实例

为了了解在需求响应活动中采用电价激励措施的用户需求响应活动的负荷消峰填谷效果及用户的节电收益情况, 对负荷优化响应模型进行求解计算, 计算时假定的用户峰、谷分时电价政策如下:

将每年的七、八月份定义为实施尖电价的月份，尖电价时间段为每日的14:00~15:00、18:00~20:00；其他月份实施峰、平和谷电价政策，公共机构、大工业用户各个时间段的用电电价分别为尖电价1.20元/kW·h，峰电价0.90元/kW·h，平电价0.60元/kW·h，谷电价为0.30元/kW·h；将用电负荷特性划分为峰时、平时和谷时三个时段，每一时段为8 h，峰时段为7:00~11:00、17:00~21:00；平时段为11:00~17:00、21:00~23:00；谷时段为23:00~次日7:00。商业用户各个时段的用电价格在公共机构及大工业用户的各时间段用电价格基础上乘以1.5系数。

在该电价机制下的用户需求响应活动的响应结果如表2所示。

表2 用户需求响应活动的电价激励响应结果

行业	尖消减 比例(%)	峰消减 比例(%)	平消减 比例(%)	谷填充 比例(%)	电费减少 比例(%)
公共机构	15.2	8.1	2.1	15.6	8.2
中等工商业	10.7	6.9	1.5	12.0	6.6
大商业用户	9.1	6.0	1.2	10.6	5.5
大工业用户	10.3	6.7	0.3	12.3	5.8

通过对以上结果的分析可以看出，实施需求响应不但能减少电网尖、峰时段的用电负荷，而且也在很大程度上减少了用户的电费开支。

结束语

用户的需求侧响应是电力需求侧管理中的一项重要内容，本文通过分析用户需求响应活动的参与实体及各个参与实体的主要市场活动，提出

用户需求响应活动的负荷优化响应模型，并给出其响应目标函数及其约束条件，然后对峰谷分时电价激励下的用户需求响应活动的响应收益与负荷消减效果进行分析，给出用户需求响应活动的优化方程求解方法。通过分析实例的计算结果表明，本文给出的实施需求响应模型不仅可以消减电网尖、峰时段的用电负荷，填充谷时段的用电负荷，还可以在一定程度上减少用户的电费支出。

参考文献

[1] 李志刚，吴文传，张伯明，等．一种基于高斯罚函数的大规模无功优化离散变量处理方法[J]．中国电机工程学报，2013(4)：68-74.

[2] 潘敬东，谢开，华科．计及用户响应的实时电价模型及其内点法实现[J]．电力系统自动化，2005(23)：8-14.

[3] 盛万兴，史常凯，孙军平，等．智能用电中自动需求响应的特征及研究框架[J]．电力系统自动化，2013(23)：1-7.

[4] 赵鸿图，朱治中，于尔铿．电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]．电网技术，2010(5)：146-153.

[5] 董萌萌．基于峰谷电价的需求响应效果评价[D]．北京：华北电力大学，2014.

[6] 刘继东，韩学山，韩伟吉，等．分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]．电网技术，2012(10)：2973-2978.

(收稿日期：2015-06-15) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告