

基于接纳控制的智能电网需求响应

马 锴¹, 姚 婷¹, 关新平^{1,2}

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海交通大学 自动化系, 上海 200240)

摘 要: 采用效用函数刻画用户的用电满意度, 将需求响应问题建模为一类凸优化问题. 针对电力供应商的供电量不能满足用户最小用电需求的问题, 结合分布式用电量调度和实时定价, 设计两类接纳控制算法. 仿真结果表明, 通过接纳控制, 满足了购电用户的最小用电需求, 保证了用户的用电质量, 能够实现电网的供需平衡.

关键词: 智能电网; 需求响应; 实时电价; 凸优化; 接纳控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Demand response based on admission control in smart grid

MA Kai¹, YAO Ting¹, GUAN Xin-ping^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: MA Kai, E-mail: kma@ysu.edu.cn)

Abstract: Utility functions are used to denote the satisfaction of consumers and formulate demand response as a convex optimization problem. For the case that the power supply can not meet the minimum power consumption of the consumers, two admission control algorithms are designed, combining with distributed power consumption scheduling and real-time pricing. Simulation results show that the admission control makes the consumers meet the minimum power consumption, ensure the power quality of the consumers, and balance the supply and the demand in smart grid.

Keywords: smart grid; demand response; real-time pricing; convex optimization; admission control

0 引 言

智能电网集传感器测量、决策控制和能源电力技术于一体, 以实现电网的可靠、经济和高效运行^[1]. 需求响应是实现电网智能化的关键问题之一, 是电力用户根据市场价格信号或激励机制作出响应, 改变其用电模式的市场参与行为^[2]. 实时电价(RTP)是实现需求响应的一种有效的定价策略^[3]. 基于实时电价, 文献[4]采用非合作博弈的方法设计用户的用电调度策略, 降低了用户总电能需求的峰平比. 文献[5]针对一个用户的所有用电器, 提出了价格预测方案, 通过对用户一天的用电量进行调度, 实现了用电成本与用电器运行等待时间的折衷. 文献[6]基于机制设计理论, 提出了激励相容的用户需求订购模型. 文献[7]基于效用最大化的方法提出了实时电价方案, 实现了供需匹配. 文献[8]基于改进对偶分解的近端中心算法,

提高了实时定价算法的收敛速度.

上述方案均没有考虑当电力供应商的供电量不能满足用户的最小用电量需求的问题. 鉴于此, 本文提出了基于接纳控制的需求响应方案. 接纳控制方法源于计算机网络, 用于允许或者拒绝用户接入网络^[9]. 将接纳控制方法引入到智能电网的需求响应中, 电力供应商可以根据购电用户的最小用电需求决定是否允许用户接入, 以保证用户的用电质量.

在本文提出的需求响应方案中, 电力供应商和用户联合计算最优电价和用电量. 仿真结果表明, 所提出的算法使用户对电力供应商提供的电能有较高的利用率, 并能最大化所有用户的满意度. 同时通过接纳控制, 满足了购电用户的最小用电量需求, 保证了用户的用电质量.

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2014-02-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203104, 61174127, 61221003); 河北省自然科学基金项目(F2012203126); 高等学校博士学科点专项科研项目(20121333120012, 20110073120025, 20110073130005); 燕山大学博士基金项目(B632).

作者简介: 马锴(1983—), 男, 副教授, 从事智能电网需求响应、网络资源分配的研究; 关新平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事通信网络拥塞控制、电网设备监控与控制等研究.

1 系统模型

考虑包括一个电力供应商和多个用户的智能电力系统. 假设每个用户的智能电表均含有一个电能控制器 (ECC), 所有的 ECC 单元互联且通过双向通信网络 (如局域网) 与电力供应商相连接.

用户的用电调度周期分为 K 个时隙, \mathcal{K} 为所有时隙的集合, $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, k, \dots, K\}$; \mathcal{N} 为所有用户的集合, $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$; L_k 为电力供应商在时隙 k 的供电量. 对于每个用户 $i \in \mathcal{N}$, x_i^k 表示用户 i 在时隙 k 的用电量. 假设用户 i 在时隙 k 的最小用电需求为 m_i^k , 那么用户 i 的用电量需满足如下约束条件:

$$x_i^k \geq m_i^k. \quad (1)$$

在电力系统中, 每个用户都是行为独立的个体, 对电能的需求随不同的参数变化而发生变化. 例如, 一天中不同的时间、气候条件和电价都会对用户的电能需求产生影响. 不同类型的用户, 其电能需求也不同, 例如, 家庭用户和工业用户对相同电价的响应不同. 不同用户对各种电价的响应可以用微观经济学中的效用函数表示^[10], 效用函数描述了用户使用一定电量所获得的满意度, 本文采用可以实现比例公平性的对数函数

$$U_i(x_i^k, w_i^k) = w_i^k \ln(x_i^k + 1), \quad (2)$$

其中 w_i^k 为用户的购电意愿参数, 不同的用户在不同时隙 w_i^k 值不同. 上述效用函数具有如下性质: 效用函数是非减函数, 增加用电量会提高用户的满意度; 效用函数是凹函数, 用户的满意度随着用电量的增加逐渐饱和; 对于固定的用电量 x_i^k , w_i^k 越大, 对应的效用函数值越大, 即用户的满意度随用户购电意愿的增加而增大; 当用电量为 0 时, 效用函数值为 0, 即用户不用电时, 其满意度为 0.

2 问题描述和求解

电力市场需求的目标是在用户的总用电量不超过电力供应商供电量的约束下, 最大化所有用户的满意度之和, 表示为如下最优化问题:

$$\begin{aligned} (\text{P1}) \quad & \max_{x_i^k} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{N}} U_i(x_i^k, \omega_i^k). \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i^k \leq L_k, \quad \forall k \in \mathcal{K}; \\ & x_i^k \geq m_i^k, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \end{aligned}$$

在每个时隙内, 用户的购电意愿参数 ω_i^k 是不变的, 因此, 问题 (P1) 对于每个时隙 $k \in \mathcal{K}$ 是可分离的, 即可以在每个时隙 $k \in \mathcal{K}$, 求解如下优化问题:

$$\begin{aligned} (\text{P2}) \quad & \max_{x_i^k} \sum_{i \in \mathcal{N}} U_i(x_i^k, \omega_i^k); \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i^k \leq L_k, \\ & x_i^k \geq m_i^k, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \end{aligned}$$

由于每个用户存在最小用电需求 m_i^k , 实际的电力市场中存在电力供应商的供电量不能满足所有用户最小用电需求之和的情况, 即

$$L_k < \sum_{i \in \mathcal{N}} m_i^k. \quad (3)$$

在这种情况下, 优化问题 (P2) 无可行解. 对于优化问题 (P2), 暂不考虑最小用电需求约束式 (1), 得到如下凸优化问题:

$$\begin{aligned} (\text{P3}) \quad & \max_{x_i^k} \sum_{i \in \mathcal{N}} U_i(x_i^k, \omega_i^k); \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in \mathcal{N}} x_i^k \leq L_k, \quad \forall i \in \mathcal{N}. \end{aligned}$$

对于优化问题 (P3), 其拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L(x_i^k, \lambda^k) = & \sum_{i \in \mathcal{N}} U_i(x_i^k, \omega_i^k) - \lambda^k \left(\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i^k - L_k \right) = \\ & \sum_{i \in \mathcal{N}} (U_i(x_i^k, \omega_i^k) - \lambda^k x_i^k) + \lambda^k L_k, \end{aligned}$$

其中 λ^k 为拉格朗日乘子. 其对偶函数为

$$\begin{aligned} D(\lambda^k) = \max_{x_i^k} L(x_i^k, \lambda^k) = \\ \sum_{i \in \mathcal{N}} B_i^k(\lambda^k) + \lambda^k L_k, \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$B_i^k(\lambda^k) = \max_{x_i^k} (U_i(x_i^k, \omega_i^k) - \lambda^k x_i^k). \quad (5)$$

由此, 得到优化问题 (P3) 的对偶问题为

$$(\text{P4}) \quad \min_{\lambda^k > 0} D(\lambda^k).$$

对偶函数 (4) 的第 1 部分可以分解为 N 个局部优化问题 (5), 局部优化问题 (5) 可以由每个用户分布式求解, 不需要其他用户的参数信息. 由于原优化问题 (P3) 是凸优化问题, 根据强对偶性原理, 可以通过求解对偶优化问题 (P4) 代替求解原优化问题 (P3). 具体过程为通过求解对偶问题 (P4) 得到解 λ^k , 进而每个用户通过求解局部优化问题 (5) 获得 x_i^{k*} . 算法表述如下:

$$x_i^{k*}(\lambda^k) = \arg \max_{x_i^k} (U_i(x_i^k, \omega_i^k) - \lambda^k x_i^k), \quad (6)$$

$$\lambda_{t+1}^k = \left[\lambda_t^k + r \left(\sum_{i \in \mathcal{N}} x_i^{k*}(\lambda_t^k) - L_k \right) \right]^+. \quad (7)$$

其中: λ^k 为拉格朗日乘子, 表示电力供应商在时隙 k 的电价; $x_i^{k*}(\lambda^k)$ 为用户在电价 λ^k 下的最优用电量; r 为迭代步长; t 为迭代次数.

3 接纳控制

当用户不满足其最小用电需求 m_i^k 时, 设计如下接纳控制算法, 使该类用户停止当前购电计划, 进而选择其他供电商。

Step 1: 基于用电调度算法 (6) 和实时定价算法 (7), 获得最优的用户用电量和实时电价。用户将获得的用电量与其最小用电需求进行比较, 如果获得的用电量小于最小用电需求, 则向电力供应商发送停止购电信息。

Step 2: 电力供应商接收到停止购电信息后, 所有不满足最小用电需求的用户停止购电, 不需要向用户反馈确认信息, 接纳控制算法结束 (算法 1)。或者选择用电量与其最小用电需求相差最大的用户停止购电, 并将这一信息反馈给用户 (算法 2)。如果没有收到用户的停止购电信息, 则接纳控制算法结束。

Step 3: 在算法 2 中, 当用户接收到反馈确认信息后停止购电, 选择其他供电商; 否则, 转至 Step 1。

接纳控制算法 1 (不包括虚线部分) 和接纳控制算法 2 (包括虚线部分) 如图 1 所示。比较上述两种接纳控制算法可见: 接纳控制算法 1 一次性使所有不满足最小用电需求的用户停止购电, 接纳控制算法 2 首先使与最小用电需求相差最大的用户停止购电, 进而对剩余的用户重新进行用电量分配。接纳控制算法 2 的优势在于可以使得不满足最小用电需求的用户在后续的调度过程中满足最小用电需求, 但增加了调度过程的复杂度。

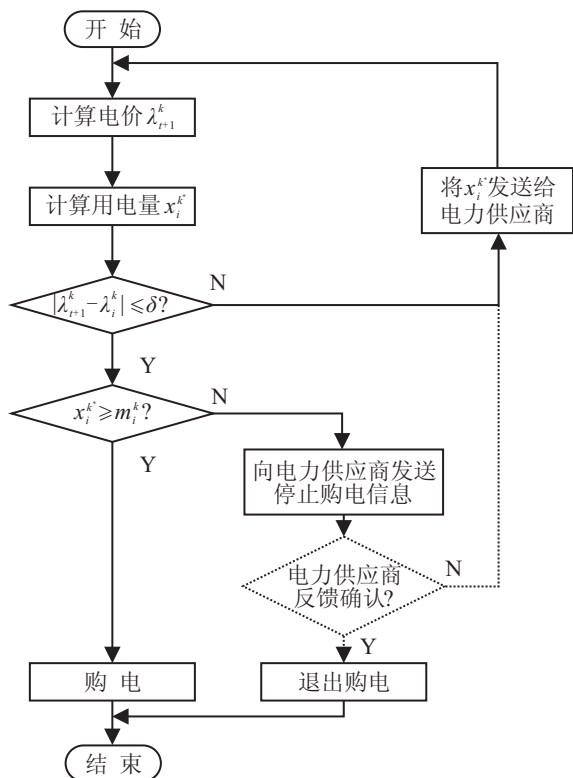


图 1 接纳控制算法

4 仿真分析

在仿真模型中, 假设有 10 个用户, 用户的用电周期分为 24 个时隙, 每个用户的购电意愿参数随机分布于 [1, 4] 区间内。电力供应商在各时隙的供电量随机分布于 [5 kW, 50 kW] 区间内。在实时电价和固定电价下, 用户的总用电量在不同时隙的变化情况如图 2 所示。可见, 本文提出的用电调度和实时定价策略能够有效地降低峰平比, 同时, 电力供应商的供电量和用户的总用电量匹配, 且用户对电力供应商提供的电量有较高的利用率。

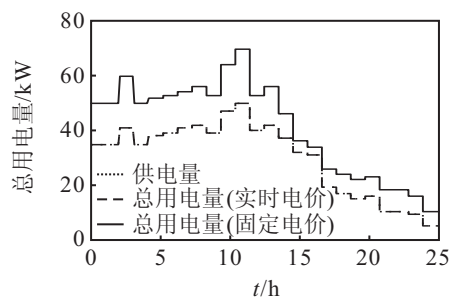


图 2 用户总用电量

假设某一时隙电力供应商的供电量不能满足所有用户的最小用电量需求, 用户的用电量与其最小用电需求如表 1 所示。由表 1 可见, 用户 1、2、7、8、9 尚不满足最小用电需求。

用户	1	2	3	4	5
用电量	2.56	2.95	6.11	6.91	5.32
最小用电需求	2.9	3.2	5.8	6.4	5.1
用户	6	7	8	9	10
用电量	4.93	0.976	3.94	1.96	4.34
最小用电需求	4.8	1.6	4	2.4	4.3

图 3 为电力供应商完成接纳控制算法 1 后每个用户的用电量, 图 4 为电力供应商完成接纳控制算法 2 后每个用户的用电量。由图 3 和图 4 可见, 基于接纳控制算法 1 和 2, 不满足最小用电需求的用户停止购电, 使得参与购电的用户均满足最小用电需求; 接纳控制算法 2 使得最初不满足最小用电需求的用户 2 和用户 8 最终满足需求, 因此, 在接纳控制算法 2 下电力供应商能够为用户提供更好的服务质量保证。

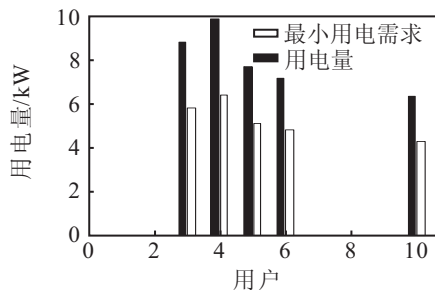


图 3 剩余用户的用电量 (接纳控制算法 1)

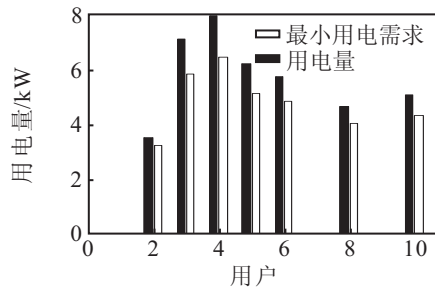


图 4 剩余用户的用电量 (接纳控制算法 2)

5 结 论

针对电力供应商的供电量不能满足所有用户最小用电需求的问题,提出了基于接纳控制的智能电网需求响应方案.通过设计分布式用电量调度和实时定价算法得到用户的最优用电量和电价,进而通过设计两类接纳控制算法,满足了购电用户的最小用电量需求.所提出的接纳控制方法为电力市场提供了一种可行的需求响应策略.

参考文献(References)

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
(Yu Y X, Luan W P. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of The CSEE, 2009, 29(34): 1-8.)
- [2] 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, 34(5): 146-153.
(Zhao H T, Zhu Z Z, Yu E K. Study on demand response markets and programs in electricity markets[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 146-153.)
- [3] 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 M H, Xu M. Researches on spot price based on optimal power flow and its algorithm[J]. Relay, 2006, 34(21): 63-68.)
- [4] Mohsenian-Rad A, Wong V W S, Jatskevich J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [5] Mohsenian-Rad A H, Leon-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [6] 沙泉, 张少华, 李渝曾. 基于机制设计理论的用户需求订购模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 54-59.
(Sha Q, Zhang S H, Li Y Z. A customer demand subscription model based on mechanism design theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 54-59.)
- [7] Samadi P, Mohsenian-Rad A, Schober R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]. IEEE 1st Int Conf on Smart Grid Communications. Gaithersburg: IEEE, 2010: 415-420.
- [8] 徐伟强, 冯兆丽, 黄炯, 等. 基于改进对偶分解的智能电网快速实时定价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 42-47.
(Xu W Q, Feng Z L, Huang J, et al. Fast real-time pricing method based on improved dual decomposition for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 42-47.)
- [9] 高文宇, 陈松乔, 王建新. 接纳控制研究综述[J]. 计算机工程, 2005, 31(1): 1-2.
(Gao W Y, Chen S Q, Wang J X. Research of admission control in IP networks[J]. Computer Engineering, 2005, 31(1): 1-2.)
- [10] Mas-Collel A, Whinston M D, Green J. Microeconomic theory[M]. New York: Oxford University Press, 1995: 46-50.

(责任编辑: 郑晓蕾)