

基于精细化模型的需求侧响应策略分析

赵慧颖^{1,2}, 刘广一¹, 贾宏杰², 杨占勇¹, 范士雄¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津 300072)

摘要: 提出了居民侧负荷中的热力学可控负荷(空调系统和热水器)的精细化模型。详细分析了电价信号对其的调控方式。并以IEEE13节点典型馈线系统为例,在固定电价、分时电价和实时电价策略的激励下对系统进行了仿真,详细分析了居民侧负荷在不同电价的激励下负荷行为的改变,以及在配网中加入波动性大的分布式电源后配网注入功率被需求侧响应资源调节的情况。该研究得出了需求侧响应在平缓分布式电源的波动性及削减负荷高峰方面可做出贡献的结论。

关键词: 精细化建模; 需求侧响应; 分布式电源; 价格信号; 配电网

Analysis of demand response program based on refined models

ZHAO Hui-ying^{1,2}, LIU Guang-yi¹, JIA Hong-jie², YANG Zhan-yong¹, FAN Shi-xiong¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The refined models of residential thermostatically controlled loads (heating, ventilating and air conditioning system and water heater) are built. The regulating and controlling ways of price signal on the models are analyzed in detail. The simulation is implemented in IEEE 13 node typical feeder system under different tariff incentives. The tariff includes the fixed rate, time of use pricing and real time pricing. Changes of load behavior are analyzed under different price signal, and how demand response smooths out fluctuations of distributed generation (DG) are shown. This study demonstrates the performance of demand response, which contributes to gentle the instability of DGs and peak load shifting.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377117).

Key words: refined modeling; demand response; distributed generation; price signal; distribution network

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0062-08

0 引言

伴随着智能电网的建设,需求侧响应(Demand Response, DR)技术的研究得以迅速发展,通过政策措施和经济激励来引导用户在用电高峰时期少用电、低谷时多用电,不仅可以提高用电效率、优化用电方式,还可以缓解缺电压力、降低供电成本、提高电网资产利用率。

随着大量分布式电源并网及其渗透率的不断提高,可再生能源(风机、光伏等)的不确定性对电网的安全运行造成影响。文献[1]主要针对DR与风电并网的协作效益,设计考虑市场成熟度的风电并网的需求响应模式,促进风电并网消纳,但未提

及具体详细的风电模型及需求侧负荷模型。文献[2]综合考虑了风电机组出力的不确定性,建立了风电出力估算模型和基于DR机制的输电规划模型,但没有说明详细的DR策略。文献[3]通过协调各分布式电源、储能装置以及DR来实现微网的多目标能量优化。文献[4]通过分析不同电价模式下的小型风机的接入对电网经济效益的影响,但也未详细描绘系统模型。文献[5]将冰箱、空调、热水器作为家居型温控负荷的代表,分析其快速响应特性、储能特性及高可控性,但未考虑电价激励。文献[6]提出了基于需求侧减排的节能调度方法并提出了双层优化模型,但未提出具体的居民侧行为的改变。文献[7]提出了需求侧管理成本效益分析模型,但同样偏重于经济性分析,而不是着眼于居民侧。文献[7]中构建了全新的计及需求侧响应的短期输电阻塞管理模型,而文献[8]中则构建了分时电价对购售电风险影

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377117); 国家电网公司科技项目(DZB17201200260)

响的分析模型, 文献[9]建立了两种不同电价的联合优化模型, 文献[10]提出了最优电价决策方法, 文献[11]构建了DSM成本效益分析模型, 以上均是从经济学角度构建模型。

综上所述, 本文通过对DR可调节的负荷侧设备精细化建模, 设计不同电价信号激励场景, 通过连续时间序列仿真, 分析负荷侧用电行为方式的转变。研究加入精细化模型后, 在不同电价策略的激励下, 房屋中的空调设备、热水器设备负荷行为的变化, 以及在分布式电源出力波动性较大时, DR如何有效地平缓其波动, 同时又达到了削峰的目标。

1 精细化模型的建立

本文精细化建模主要是针对用电负荷侧。对于用电负荷侧的以往建模方式多为模糊建模, 假设房屋为简单的恒功率负荷, 无法精确观察 DR 对负荷行为的影响。而本文是将房屋考虑为可参与 DR 的各类家用电器的集总负荷, 该负荷的功率会随着电价信号、天气的变化而改变。房屋中包括有洗衣机、洗碗机、烘干机、空调、风扇、灯、微波炉、热水器等家用电器。通过对房屋中家用电器的精细化建模, 可观察在不同电价策略的激励下, 各种家用电器的调节方式及其对整体电网电压、功率波动的影响, 支持对负荷的精确控制, 提高用户参与 DR 的灵活性。其中对房屋整体功率调节有较大影响的负荷包括房屋的空调系统(Heating, Ventilating and Air Conditioning, HVAC)及热水器。通过详细观察风机随外界天气等因素的变化规律, 从而有针对性地对其实行平缓波动性的措施, 为日后研究其与 DR 策略相结合的优化调度方法提供了基础。在此详细建立了 HVAC 设备、热水器的数学模型。

1.1 HVAC设备模型

仿真过程中利用的房屋模型见图1, 主要考虑如下四方面的吸收或损失热量途径:

- (1) 外部墙壁、地板以及房顶的吸放热 (基于房屋墙壁、地板和房门等的热导);
- (2) 空气吸放热 (基于空气交换速率);
- (3) 太阳能辐射 (基于天气变化);
- (4) 内部人、灯、电子设备及其他终端负荷等放热 (基于设备使用情况)。

前三点途径均为电网不可控因素, 第四点中的热力学可控负荷是DR控制的主要对象。其中, 房屋的HVAC设备发挥了主导作用。在此用等效热能参数法(Equivalent Thermal Parameter, ETP)将HVAC设备系统等效为简单的电路系统。该系统数学模型见文献[12]。

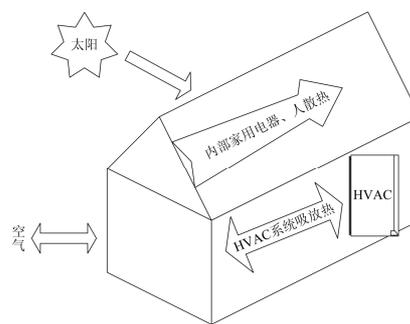


图1 房屋热能交换模型示意图

Fig. 1 House thermal energy exchange model

在需求侧响应策略实施过程中, 每个设备上的主动控制器起到了关键性作用。设备主动控制器上的线性控制算法如图2所示。该主动控制器可以将用户的需求转换为市场的竞标价, 该价格由当前温度值决定。

$$P_{bid} = (P_{cleared} - T_0) \cdot k \cdot \sigma / |T_{max/min}| + P_{avg} \quad (1)$$

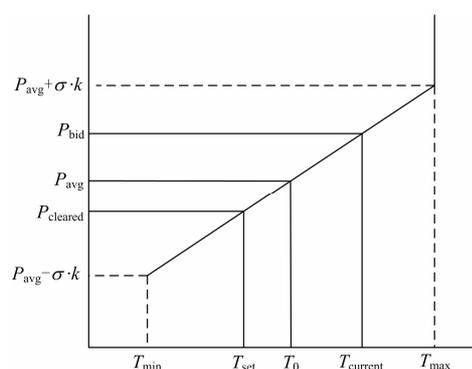


图2 主动控制器线性算法

Fig. 2 Linear algorithm of the active controller

电力市场收集各设备的竞标价后进行竞卖, 竞标周期为30 min, 随即市场出清。在竞标模型中, 需求侧和供电侧分别提供竞标曲线, 两条曲线的交点即为市场出清价格。随后电价信号又会传递回设备的主动控制器中, 从而转换为设备设定温度的改变, 由式(1)可推导出

$$T_{set} = T_0 + (P_{cleared} - P_{avg}) \cdot |T_{max/min}| / k \cdot \sigma \quad (2)$$

式中: P_{bid} 、 P_{avg} 、 $P_{cleared}$ 分别为设备竞标价、市场均价以及市场出清价格; σ 为市场价格标准差; k 为设备主动控制器中线性控制算法的价格函数曲线(见图2)的斜率; $T_{max/min}$ 为用户允许的温度最大调节范围; T_0 、 $T_{current}$ 、 T_{set} 分别为设备期望温度设定值、当前温度设定值以及根据电价信号调节后的温度设定值。

设定温度值的变化从而改变了空调消耗的功率，通过对多个用户空调信息的集总，即可获得馈线上空调的总功率的变化，对所有空调改变的功率求和，则是一个可观的功率削减量，从而对电网的紧张状况起到一定的缓解作用。

1.2 热水器数学模型

在热水器运行中，水由分别位于水箱底部和顶部的两部分加热器加热。顶部加热器在感知周边水温低于一定限值或冷水水位高于一定限值时，顶部加热器随即启动，但是两个加热器优先级不同，顶部加热器优先。热水器水箱含有三种状态：充满、部分充满和空箱。部分充满状态时根据热水流速还分为稳定状态、即将耗尽状态、即将充满状态。对应不同的状态分别消耗不同的功率，这与水箱大小、水箱中水的热容、流速、外温、恒温器设定值、控制区间、水箱外壳热损失等因素均有关。单节点和双节点的水热水器模型如图3(a)、图3(b)所示。

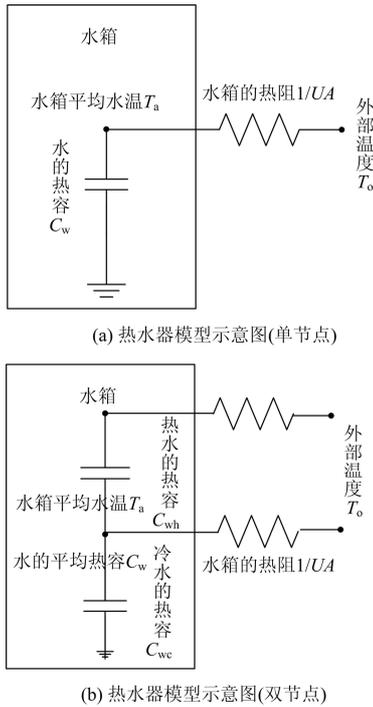


图3 热水器模型示意图

Fig. 3 Water heater model schematic

1.2.1 单节点模型

该模型为一个简单集中参数的电气近似模型，将水箱考虑为一个统一温度的水的集中体，用于水箱在完全充满或空箱状态。可通过水箱原始温度值，计算经过特定时间后水箱的最终温度值。

根据图3可知，若将热水器整体假设为热容为 C_w 节点，对于该节点的热平衡方程为

$$C_w \frac{dT}{dt} = Q_{ele} - \dot{m}C_p(T - T_{in}) + UA(T_o - T) \quad (3)$$

重新整理得

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{ele} - \dot{m}C_p(T - T_{in})}{C_w} + \frac{UA(T_o - T)}{C_w} \quad (4)$$

$$dt = \frac{dT \cdot C_w}{Q_{ele} - \dot{m}C_p(T - T_{in}) + UA(T_o - T)} \quad (5)$$

积分可得

$$\Delta t = \frac{-C_w}{UA + \dot{m}C_p} \cdot \log_{T_w} \left(\frac{Q_{ele} + \dot{m}C_p T_{in} + UA \cdot T_o}{C_w} - \frac{UA + \dot{m}C_p}{C_w} T \right) \quad (6)$$

$$T = T_{in} e^{b\Delta t} + \left(\frac{Q_{ele} + \dot{m}C_p T_{in} + UA \cdot T_o}{UA + \dot{m}C_p} \right) (1 - e^{b\Delta t}) \quad (7)$$

式中： UA 为水箱传递热的热导值； T_{in} 为注入水的初始温度； T_o 为水箱外部温度； T 为最终温度值， C_w 为水箱中水的平均热容； T_w 为水的平均温度； \dot{m} 为流速； Q_{ele} 为水箱吸热速率； b 为系数； Δt 为温度变化的时间差； C_p 为功率因数。

1.2.2 双节点模型

该模型用于水箱的部分充满状态。水分为两部分，每部分都有各自统一的温度。上层热水节点接近水箱中恒温器设定温度，下层冷水节点接近水箱进水温度。这个模型考虑了冷热水节点间的边界。通过温度差，可计算出冷热水的新边界高度。同样地，冷热水边界的高度也可假设为时间的积分。其数学公式为

$$t_1 - t_0 = \frac{1}{a_2} \cdot \log_{h_0} \left(\frac{dh}{dt} \right) \quad (8)$$

同时 $\frac{dh}{dt}$ 是水箱中水温随温度变化的坡度，同时也是水流速和温度差的函数，可表示为

$$\frac{dh}{dt} = a_1 + a_2 h \quad (9)$$

式(9)代入式(8)，得

$$t_1 - t_0 = \frac{1}{a_2} \cdot \log_{h_0} (a_1 + a_2 h) \quad (10)$$

经推导可得

$$h = \frac{e^{bT_w} \cdot (a_1 + a_2 h_0) - a_1}{a_2} \quad (11)$$

其中

$$a_1 = \frac{-(\dot{m}C_p)}{C_w} + \frac{Q_{ele} + UA \cdot T_o}{C_w T_{lower}}, \quad a_2 = \frac{UA}{C_w}$$

式中： h 为冷热水新边界高度； h_0 为原边界； T_{lower}

为水箱下部分水平均温度。

热水器受电价信号调节机制与HVAC设备相似, 安装在热水器上的主动控制器可根据市场的出清价格和当前热水器的温度值及水箱情况对其中的两个恒温器的设定温度进行实时调节。通过给定电价, 热水器的控制器便会计算出所对应的设定值及冷热水边界的高度, 随后便响应调节热水器的工作状态。同样地, 热水器在每个迭代周期初始会计算自上一迭代周期开始后的能耗, 随即更新热水器的水箱温度或冷热水边界高度, 从而辨识出热水器是否需要加热, 然后计算出热水器直到下一工作状态改变前所需要的过渡时间, 并将时间传递给控制器。热水器的调节周期为5 min。

1.3 风力发电机数学模型

风力发电系统中, 风力发电机的输出功率与风速、叶片受风面积等因素有关。其捕获的机械功率可表示为^[13]

$$P_m = \rho v^3 S C_p / 2 \quad (12)$$

式中: ρ 为空气密度; S 为风力发电机的扫掠面积; C_p 代表风力发电机的风能利用系数; v 为风速; P_m 为机械功率。由于风机利用系数与多种因素有关, 文献[13]详细描述了 C_p 值的取值过程。

本文所采用的通用同步中型风力发电机详细参数见表1。

表1 风机参数表
Table 1 Parameters of wind turbine

额定容量/MW	半径/m	最大功率/MW	风机高度/m	额定电压/V	最大风能利用系数	功率因数
0.1	23.2	0.15	30	480	0.302	0.9
定子电抗标么值	有无齿轮箱	切入风速/(m/s)	切出风速/(m/s)	额定风速/(m/s)	定子电抗标么值	
0.12	无	3.5	25	14.5	0.17	

2 需求侧响应电价策略

DR主要分为基于电价的DR和基于激励的DR。本文主要考虑基于电价的DR策略。基于电价的DR策略分为固定电价、关键尖峰电价(Critical Peak Pricing), 分时电价(Time of Use Pricing), 实时电价(Real Time Pricing)。本文重点考虑固定电价、分时电价和实时电价。

2.1 固定电价(Fixed Rate, FR)

固定电价与居民用电量大小及用电时间无关, 该电价为全年固定电价, 是一种传统电价模式。所

代表含义为居民消耗每千瓦时(度)电量所需支付电费。本文设定电价为0.547 元/kWh。

2.2 分时电价(Time of Use, TOU)

分时电价是一种基于时间的电价策略, 指电力市场中的电价随着时间的变化而变化, 在电网负荷的高峰期实行较高的电价, 而在电网负荷的低谷期实行较低的电价。通常分时电价应用于全年, 有2~3个价格区间, 尖峰期价格是非尖峰期价格的2~5倍^[14], 每个区间大约持续4~18个 h。本文假定夏季某工作日的TOU电价如表2, 图4。TOU电价的实施依赖于安装于设备上的被动控制器。该控制器可根据电价信号改变设备操作状态, 但无法把设备需求反馈回电网进行电力市场的竞价过程。

表2 TOU 策略电价表

Table 2 Price of TOU programs

TOU 电价	
时间	价格(元/kWh)
0:00~7:00	0.399
8:00~11:00	0.536
12:00~18:00	0.652
19:00~21:00	0.536
22:00~23:00	0.399

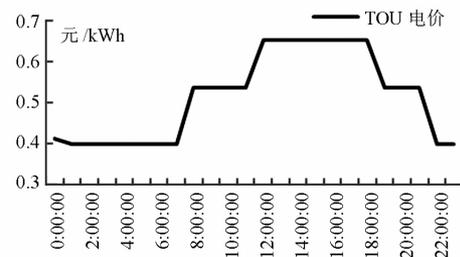


图4 TOU 电价示意图

Fig. 4 Time of use price signals

2.3 实时电价 (Real Time Pricing, RTP)

实时电价是一种更高级的电价形式, 是一种反应电力商品的“瞬时”成本的电价, 是动态定价机制。实时电价的实施依赖于安装在设备上的主动控制器, 该主动控制器可作为设备的代理参与市场竞标。通过零售电价与电力批发市场的出清电价联动, 能够精确反映各时段供电成本的变化, 及时有效地传达电价信号。主动控制器每5 min监测当前设备运行状态, 并向市场进行出价, 每半个小时市场出清, 随即将出清价格传递给每个主动控制器, 主动控制器依据价格调节设备运行状态。该电价实时改变, 是需求侧响应的最完美实现。

3 算例分析

为了分析电价信号对电网的影响及其平缓居民侧分布式电源的效果,本文采用修改后的IEEE13节点配网测试系统进行仿真^[15],如图5所示。本文仿真中所采用的分布式电源以风机为例。

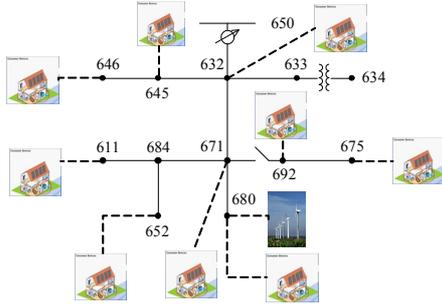


图5 修改后的 IEEE-13 节点测试系统
Fig. 5 Modified IEEE-13 test system

系统中包括637个独立居民房屋以及额定功率为100 kW的风机。各节点所接居民房屋个数见表3,并假设所有居民均参与DR调控。由于分布式电源的出力大小及DR的负荷减载情况均与天气信息有着直接或间接的关联,仿真也将天气信息作为输入参数之一。本文以美国西雅图地区的天气文件为例^[16],从中可获取温度、湿度、光照、风速等基本信息。每个居民负荷中,含有空调和热水器,其他电器设备暂时假设为典型静态负荷。每台空调和热水器均含有可实现RTP策略的主动控制器和实现TOU策略的被动控制器。通过输入的电价信息文件可对其负荷行为及输出功率进行调节。此外,在房屋模型中定义了其详细参数,包括面积、空调模式、空调性能、空调设定温度等。此外,假设该电力市场由热力发电、风能发电所组成,其中热力发电占主导地位。发电机在实时市场前2 h提交发电价格计划,在实时市场出清前,首先会进行需求预测和需求议价,同时允许DR资源参与日前市场和实时市场的调控。

表3 IEEE-13 各节点所接房屋个数

Table 3 Number of houses linked to the nodes in IEEE-13 feeder system

节点	646	611	645	652	671	692	675	632	680
数量	19	7	22	42	189	68	184	18	88

本文选取夏季高峰期中的一天进行连续时间序列的仿真,仿真时长为24 h,取样间隔为1 min。所采用的仿真软件为美国西北太平洋实验室开发的Gridlab-D仿真软件^[17]。

仿真基于以下三种电价场景。

(1) FR电价激励:在IEEE13节点中,680节点处接入容量为100 kW的通用中型同步风机,采用固定电价模式,电价为0.547 元/kWh。日风速变化曲线及所接入风机的输出功率分别见图6、图7。

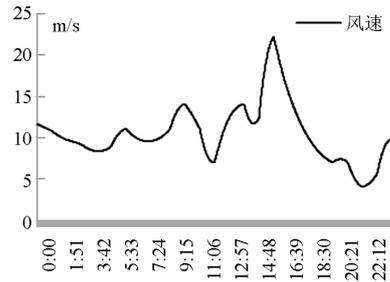


图6 日风速变化曲线

Fig. 6 Wind speed profile

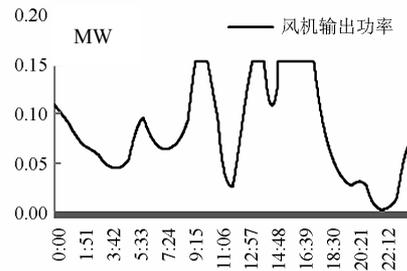


图7 风机输出有功功率曲线

Fig. 7 Daily output power of wind turbine

(2) TOU电价激励:在接入风机的同时,采用TOU电价激励措施进行激励,电价取值见表2,激活每个设备上的被动控制器;

(3) RTP电价激励:在接入风机的同时,激活每个设备上的主动控制器,RTP策略得以实现。

仿真结果分析如下。

3.1 HVAC设备仿真结果分析

HVAC设备是参与DR的重要元件。由于仿真时段为夏季,因此空调系统为制冷设备。经过Gridlab-D仿真后,该系统输出的实时电价曲线如图8所示,该曲线由供求双方共同决定。应用三种电价策略后,HVAC设备的动作行为主要由图9、图10、图11所示。其中图9为仿真后输出的系统中HVAC设备总视在功率变化曲线,图10为HVAC设备制冷温度设定值平均变化曲线,图11为房屋室内外平均温度变化曲线。

如图9所示,在夏季负荷高峰期大量空调开启,若无价格信号,此时空调设定值会维持在较低温度则引起短时负荷高峰期的产生。当电网负荷过高时,在TOU及RTP电价策略刺激下,空调温度设定值被调高,从而减少了功率的消耗。15:55左右负荷最高

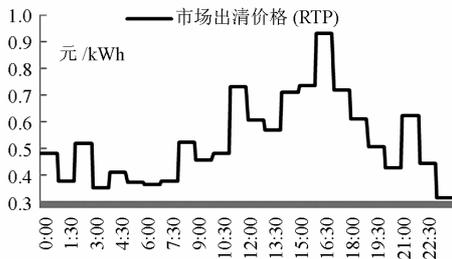


图8 市场出清价格 (RTP) 曲线

Fig. 8 Market clearing price (RTP)

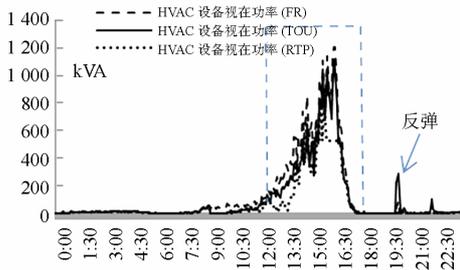


图9 系统中HVAC设备视在功率曲线

Fig. 9 Apparent power of the HVAC

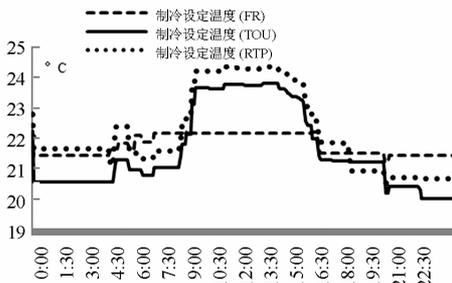


图10 HVAC制冷温度设定值变化曲线

Fig. 10 Cooling system setpoint of HVAC

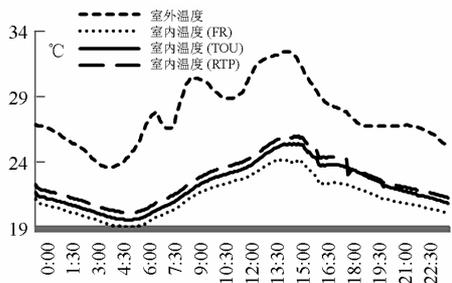


图11 房屋室内外平均温度变化对比曲线

Fig. 11 Indoor and outdoor average temperature of houses

峰时, 在RTP电价激励下, HVAC视在功率由1 208 kVA减少至528 kVA, 有效转移峰荷。但TOU电价策略激励的缺点在于反弹现象, 晚上19:00点后电价降低为0.536 元/kWh时, 功率曲线出现了反弹现象。而RTP电价由于市场的实时出清, 便无反弹现象的出现。同时由图10可以看出, 由于夏季空调处于制

冷状态, 在有效实行电价激励措施后, 高峰期的空调设定温度被调高, 总HVAC负荷会减少。

精细化建模的优势在于可精确描述每个HVAC设备的负荷特性及温度调节范围, 如图10所示。通过负荷的精细化建模, 可以为用户提供温度调节的精确范围。同时也可根据HVAC功率曲线及用户可承受的温度范围, 差异化调节HVAC的温度。但由图11所示, 无论是在TOU还是RTP电价策略激励下, 室内温度均较恒定电价场景下有轻微提高, 但不超过 3° 调节范围。 3° 的温度差用户难以感知, 但对电网的累积效果则很明显。

3.2 热水器仿真结果分析

另一种参与DR调节的重要元件便为房屋中的热水器。图12所示为仿真算例中配网总热水器输出功率示意图。如图可见, 由于电价的有效调节, 开启了热水器预热功能, 出现在早上7点半到8点半期间的高峰被有效转移, 晚高峰同样如此。

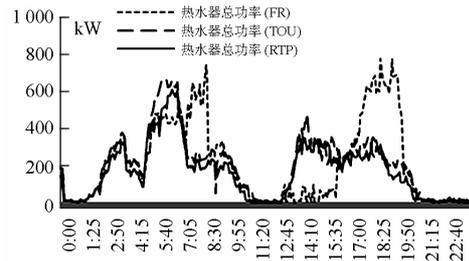


图12 热水器输出功率示意图

Fig. 12 Total output of the waterheaters

3.3 总注入功率仿真结果分析

在IEEE13节点典型馈线系统中, 12.47 kV母线通过稳压器向全网输送功率, 因此稳压器输出功率即为网络总注入功率。仿真中总注入功率变化曲线如图13。

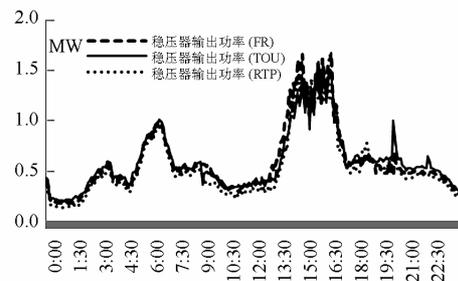


图13 系统稳压器总输出功率变化曲线

Fig. 13 Total output power of the transformer

由图13可知, 由于680节点处有风机接入, 对全网功率造成了一定的影响, 由于风机功率远小于系统容量, 因此影响很微小, 同时不会出现潮流逆向现象。但加入TOU与RTP电价激励后, RTP比TOU

平缓风电波动效果更为明显。其中RTP电价激励下的高峰期总输入功率峰值由原来的1.60 MW减少为1.48 MW, 减少了7.5%。

若在风机上加入主动控制器, 则可调控风机的出力, 进一步将之与负荷侧的用户响应协调控制, 会达到更好的效果。如何优化设计两者的协调控制策略, 将是未来的研究重点。

4 结论

本文侧重对需求侧负荷进行精细化建模, 详细分析在不同电价场景下实行 DR 后用户用电行为的转变, 观察 DR 削峰的效果, 体现了主动配电网的互动性。同时由于考虑了分布式电源风机的接入, 粗略观察了风机的波动性对电网的影响。接下来的研究工作将侧重于基于激励的 DR 对接入分布式电源后的配电网功率调节的影响, 同时建立基于需求侧响应的风机出力模型。

参考文献

- [1] 曾鸣, 李晨, 陈英杰, 等. 风电大规模并网背景下我国电力需求侧响应实施模式[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 364-367.
ZENG Ming, LI Chen, CHEN Ying-jie, et al. Implementation mode of power demand side response to large-scale wind power integrated grid in China[J]. East China Electric Power, 2012, 40(3): 364-367.
- [2] 曾鸣, 吕春泉, 邱柳青, 等. 风电并网时给予需求侧响应的输电规划模型[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 129-134.
ZENG Ming, Lü Chun-quan, QIU Liu-qing, et al. A demand-side response-based transmission planning model with grid-connected wind farms[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 129-134.
- [3] Huang Longbo, Jean Walrand, Kannan Ramchandran. Optimal demand response with energy storage management[EB/OL]. U.S: Cornell University Library, 2012. <http://arxiv.org/abs/1205.4297>.
- [4] Jose A A, Pahwa A. Economic evaluation of small wind generation ownership under different electricity pricing scenarios[C] // North American Power Symposium (NAPS), Sept 26-28, 2010: 1-4.
- [5] Charles Goldman, Michael Reid, Roger Levy, et al. Coordination of energy efficiency and demand response[EB/OL]. U. S.: Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2010. www.epa.gov/eeactionplan.
- [6] 张鹏, 刘继春, 田伟. 基于需求侧减排的节能调度及其改进 NSGA-II 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 42-48.
ZHANG Peng, LIU Ji-chun, TIAN Wei. Demand-side emission reduction based energy-saving dispatch and the improved NSGA-II method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 42-48.
- [7] 刘扬洋, 蒋传文, 李磊, 等. 考虑需求侧响应的短期阻塞管理模型与激励机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 38-43, 64.
LIU Yang-yang, JIANG Chuan-wen, LI Lei, et al. Peak regulation right trading model considering DSM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 38-43, 64.
- [8] 宋艺航, 谭忠富, 于超, 等. 需求侧峰谷分时电价对供电公司购售电风险影响分析模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 183-189.
SONG Yi-hang, TAN Zhong-fu, YU Chao, et al. Analysis model on the impact of demand-side TOU electricity price on purchasing and selling risk for power supply company[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 183-189.
- [9] 谭忠富, 谢品杰, 王绵斌, 等. 提高电能使用效率的可中断电价与峰谷分时电价的联合优化设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 161-168.
TAN Zhong-fu, XIE Pin-jie, WANG Mian-bin, et al. The optimal design of integrating price with peak-valley time-of-use power price based on improving electricity efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 161-168.
- [10] 雷霞, 刘俊勇, 都亮, 等. 基于随机机会约束规划的最优电价决策[J]. 电工技术学报, 2009, 23(12): 173-177.
LEI Xia, LIU Jun-yong, DU Liang, et al. Optimal price determination based on stochastic chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 23(12): 173-177.
- [11] 苏浩益, 李如琦. 智能电网框架下的 DSM 成本效益分析模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 69-73, 80.

- SU Hao-yi, LI Ru-qi. Cost-benefit analysis model of DSM under smart grid infrastructure[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 69-73, 80.
- [12] Wilson N W, Wagner B S, Colborne W G. Equivalent thermal parameters for an occupied gas-heated house[J]. AHRAE Transactions, 1985, 91(2B): 1875-1885.
- [13] Malinga B, Sneckenberger J, Feliachi A. Modeling and control of a wind turbine as a distributed resource[C] // Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, Mar 16-18, 2003: 108-112.
- [14] Ahamad Faruqi, Ryan Hledik. The impact of dynamic pricing on westar energy[C] // Smart Grid and Energy Storage Roundtable, Topeka-Kansas, 2009.
- [15] IEEE PES distribution systems analysis subcommittee radial test feeders[EB/OL].
<http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>.
- [16] TMY2weather data [EB/OL].
www.rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/tmy2/.
- [17] www.gridlabd.org[EB/OL].
-
- 收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2013-10-13
- 作者简介:
- 赵慧颖(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为需求侧响应策略、配电系统及其自动化、智能电网; E-mail: zhaohuiying@outlook.com
- 刘广一(1963-), 男, 博士, 中央千人计划专家, 研究方向为智能电网、能量管理系统、电力市场、分布式能源管理和控制技术;
- 贾宏杰(1973-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、配电系统规划、智能电网。E-mail: hjjia@tju.edu.cn

关于《电力系统保护与控制》杂志网站免费检索的通知

本刊网站 (<http://www.dlbh.net>) 每期已发表论文已同步于印刷版上网, 可以免费下载、阅读。敬请参阅本刊已发论文!