

「售电」

考虑售电侧开放的激励型需求响应日前调度策略

文/东南大学电气工程学院 周晓薇 陈昕儒

需求响应将需求侧作为供电侧电能的可替代资源加以利用，在售电侧开放的电力市场中将得到越来越多的应用。首先分析了售电侧开放的电力市场结构，提出需求响应聚合商的概念，建立基于激励的需求响应聚合商模型。通过类比传统的发电机组，建立需求响应聚合商成本模型。在考虑需求响应特点的运行约束条件下，建立需求响应聚合商、电力零售商以及传统发电机组共同参与系统调度的优化模型，算例分析表明需求响应聚合商可以降低系统运行成本，并减少了弃风、弃光量和削负荷，达到代替一部分传统发电资源的效果。

随着世界范围内的电力改革浪潮的推进，需求响应也被逐步引入了各国电力市场之中。售电侧开放将逐步推动电力零售商的诞生与发展，同时也为需求响应的实施带来了进一步发展的机会。在售电侧开放的背景下，电力批发市场和电力零售市场将逐步开放，大用户可以直接通过批发市场从发电厂商手中购买电能，也可以从零售商手中购电。中小用户则选择适合自身的电力零售商，以固定电价与其签订电力零售合同，从而满足自身的电力需要。同时，电力零售商的大量存在给需求响应带来了更便捷的实现渠道。电力零售商给予用户的是固定电价，而用户并没有发挥出自身的需求弹性，特别是针对负荷容量较大的电力用户，并不能有效激发其用电效益。因此，需求响应聚合商可以利用需求侧资源参与到电力市场之中。

关于需求响应的调度优化问题的研究工作，主要集中在调度模型建立和求解算法上。就调度模型而言，某些文献提出了需求响应的基本概念，构建了需求响应机制下系统日前调度优化模型及调度策略。某些文献综合考虑了系统发电机组及储能单元约束，建立了储能系统联合运行静

态模型。某文献引入了峰谷分时电价，建立了风电、储能与需求响应联合调度优化问题。就求解算法而言，某些文献运用差分进化算法、模拟退火、粒子群优化算法和自适应启发式算法求解了系统联合运行优化问题。相比传统求解算法参数难以确定、约束条件不易转化而导致寻优程度不高的问题，自适应启发式算法能获得较优的解集，但当个体极值的选取不符合多目标规划原则时，算法易陷入局部极值点，算法的搜索能力受限。

提出了一种考虑售电侧开放的激励型需求响应日前调度策略，在构建售电侧开放电力市场的组织结构的基础上，提出一种包含传统发电机组、可再生能源、传统用户、售电商和需求响应聚合商等追求系统经济效率最大化的日前调度策略。将所提出的模型与传统发电机组共同参与调度优化，采用IEEE 14节点5机系统以及某地区的实际负荷和风光电数据进行算例分析，验证了所提出模型的有效性。

售电侧开放的电力市场

零售是向最终消费者个人或团队出售生活消

费品及相关服务,以供其最终消费之用的活动。而零售商是指将商品直接销售给最终消费者的中间商。电力零售商即把电能对最终消费者进行零售的商业活动。售电侧开放将逐步推动电力零售商的诞生与发展,而电力零售商所带来的批发竞争和零售竞争将切实推动电力公司的职能转型,给电力行业带来巨大的变化。在电力市场中,可能同时存在上百个电力零售商和更多的电力用户,从而形成一个复杂的交易网络,包括电能批发市场和电能零售市场。发电商、输配电商、电力零售商和电力用户等各类市场成员都需要在电力市场中寻找对方,扮演不同的角色来完成各类电力交易的协议,从而满足自身的电力需求或经济性需要。

电力用户拥有对电力零售商的选择权,因此可以有效促进电力零售商之间的竞争从而可以提高服务质量,降低购电价格。用户与电力零售商签订零售合同来规定电价。当采用分时电价签订零售合同时,用户需要改变用电习惯,降低生产生活的便利程度,来减少电费开支。大多数的小用户和商业用户不会对电能价格的短期变化而做出积极响应。即使用户想调整需求,收益也可能较少,原因是为了向他们通告价格信息,登记各时段的消费量,需要投资按照通信设备,这会抵消相当一部分的收益。在我国电力消费的整体背景下,未来一段时间内,大量的中小用户依然倾向于按照固定价格购买电能。因此电力零售商必须按照变动的电价在批发市场上购电,然后再以固定电价向用户销售,如图1所示。

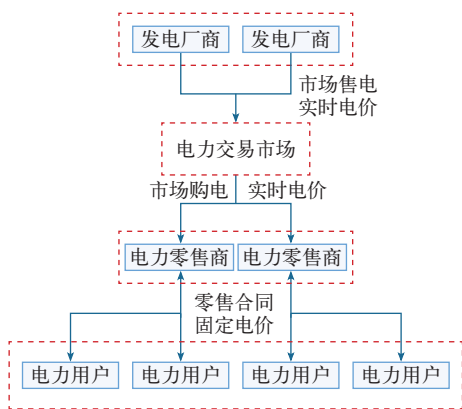


图1 电力市场中各成员定位

在售电侧开放的背景下,电力批发市场和电力零售市场将逐步开放,大用户可以直接通过批发市场从发电厂商手中购买电能,也可以从零售

商手中购电。中小用户则选择适合自身的电力零售商,以固定电价与其签订电力零售合同,从而满足自身的电力需要。同时,电力零售商的大量存在给需求响应带来了更便捷的实现渠道。电力零售商给予用户的是固定电价,因此用户并没有发挥出自身的需求弹性,特别是针对负荷容量较大的电力用户,并不能有效激发其用电效益。因此电力零售商可作为实施需求响应的主体,利用需求侧资源参与到电力市场之中,如图2所示。

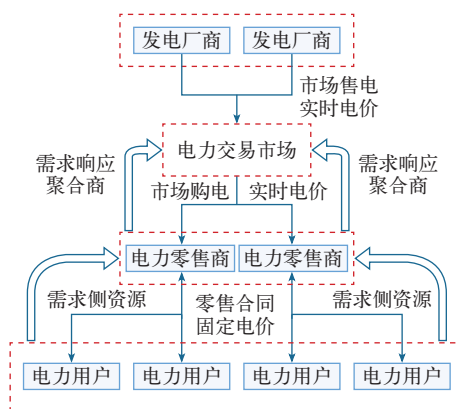


图2 需求响应聚合商在电力市场中的作用

电力零售商给用户签订基于激励的需求响应或基于电价的需求响应项目合同,根据用户的响应情况给予用户补偿或电价优惠。因为电力零售商管辖的电力用户数量较为庞大,故可以发挥不同用户在不同时段的需求弹性,引导用户转移用电或减少用电。零售商利用这部分需求侧资源在电力市场中以发电商的身份进行竞价售电,从而赚取利润。根据这一流程,需求响应聚合商在将有利于电力市场的高效运行和良性运转,扩大电能产生的社会和环境效益。

基于激励的需求响应聚集商出力模型

1. 基于激励的需求响应聚合商运行成本

需求响应聚合商通过对负荷基线的计算与预测,与用户签订基于激励或电价的需求响应合同,通过E-mail、短信和用户平台等用户发布需求响应消息。售电商通过市场竞价购买电能,以统一的零售价格向用户出售,在实施需求响应前,售电商收入为

$$C_{1,t,\text{before}}^i = p_c^i Q_{1,B,t}^i \quad (1)$$

式中, $C_{1,t,\text{before}}^i$ 为用户削减负荷前第*i*个零售商的收入; P_c^i 为第*i*个零售商给用户供电的固定电价; $Q_{1,B,t}^i$ 为用户削减负荷前第*i*个零售商的基线负荷。

用户削减负荷后第*i*个零售商的收入为

$$C_{1,t}^{i,comp} = k_1^i (Q_{1,t}^i)^2 + k_2^i Q_{1,t}^i \quad (2)$$

式中, $C_{1,t}^{i,comp}$ 为零售商给予用户的补偿; k_1^i 、 k_2^i 为补偿系数; $Q_{1,t}^i$ 为第*i*个零售商管辖下的用户削减负荷。

根据消费者边际收益曲线计算消费者削减负荷之后得到的激励补偿费用。

如图3所示深色阴影区域表示用户削减用电时剩余的损失,即用户的中断成本。假设边际收益是线性的,用户削减负荷时剩余损失成本函数就是二次的。可根据历史运行数据考量电力用户的缺电成本,进行签订可中断负荷管理合同。当第*i*个零售商管辖下的用户削减负荷 $Q_{1,t}^i$ 时,零售商对用户的补偿为

$$C_{1,t,after}^i = p_c^i (Q_{1,B,t}^i - Q_{1,t}^i) - C_{1,t}^{i,comp} \quad (3)$$

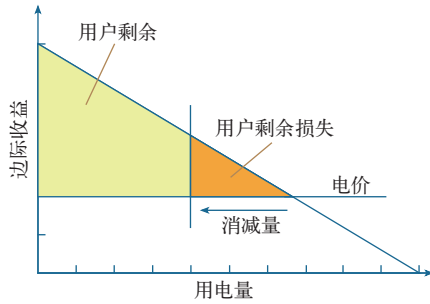


图3 消费者边际效益

需求响应聚合商管辖的电力用户数量大,因此可以充分调动用户在不同时段的需求弹性。需求响应聚合商利用这部分需求侧资源在电力市场中进行竞价售电,从而赚取利润。用户削减的负荷计算基于激励的需求响应聚合商成本为

$$\begin{aligned} C_{1,t}^i &= C_{1,t,before}^i - C_{1,t,after}^i \\ &= p_c Q_{1,B,t}^i - [p_c (Q_{1,B,t}^i - Q_{1,t}^i) - C_{1,t}^{i,comp}] \\ &= p_c Q_{1,B,t}^i - [p_c (Q_{1,B,t}^i - Q_{1,t}^i) - k_1^i (Q_{1,t}^i)^2 - k_2^i Q_{1,t}^i] \\ &= k_1^i (Q_{1,t}^i)^2 + (k_2^i + p_c) Q_{1,t}^i \end{aligned} \quad (4)$$

2. 基于激励的需求响应聚合商运行约束

基于激励的需求响应聚合商在聚合需求侧资源需要满足一定的运行约束才能保证的安全稳定运行。

(1) 用户削减量大小约束

$$P_{1,min}^i u_{1,t}^i \Delta t \leq Q_{1,t}^i \leq P_{1,max}^i u_{1,t}^i \Delta t \quad (5)$$

式中, $P_{1,min}^i$ 、 $P_{1,max}^i$ 为第*i*个零售商管辖范围内用户削减负荷的最小值和最大值; $u_{1,t}^i$ 为第*i*个零售商实施的负荷管理项目在电力市场中是否竞价成功状态, $u_{1,t}^i = 1$ 则表示竞价成功,在该时刻将削减用

户负荷以售电, $u_{1,t}^i = 0$ 则表示竞价失败,在该时刻用户无需削减负荷; Δt 为单位时间,单位为h。

(2) 用户削减持续和间隔时间约束

$$\begin{cases} (T_{1,on}^i - X_{1,t,on}^i)(u_{1,t}^i - u_{1,t+1}^i) \geq 0 \\ (X_{1,t,off}^i - T_{1,off}^i)(u_{1,t+1}^i - u_{1,t}^i) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, τ_i 为第*i*个需求响应聚集商开始运行的时刻; $X_{1,t,off}^i$ 为需求响应聚集商*i*在时刻*t*之前处于停机状态的时间; T_{on}^i 为零售商*i*同用户签订合同规定的一次削减时间; T_{off}^i 为零售商*i*同用户签订合同规定的削减最小允许间隔时间。

(3) 用户削减次数约束

$$\sum_{t=1}^T |u_{1,t}^i - u_{1,t-1}^i| / 2 \leq N_{1,set} \quad (7)$$

式中, T 为合同规定的响应周期, $N_{1,set}$ 为合同规定的在时间*T*内的用户最多削减次数。

基于激励的需求响应聚集商出力模型

1. 计算各方参与成本

目标函数主要考虑发电机组发电成本、需求响应成本、削负荷成本以及弃风弃光惩罚成本。

(1) 发电机组成本

$$f_1 = GC_{G,t}^i(Q_{G,t}^i) + UC_{G,t}^i(u_{G,t}^i) \quad (8)$$

式中, $GC_{G,t}^i(Q_{G,t}^i)$ 为时段*t*内发电商*i*的发电成本,其为分段线性函数,单位为元; $UC_{G,t}^i(u_{G,t}^i)$ 为时段*t*内发电商*i*的启动成本,其值仅在发电机组起动的时段为一固定成本其余时段为0,单位为元; $u_{G,t}^i$ 表示时段*t*内发电商*i*的机组是否启动, $u_{G,t}^i = 1$ 表示机组启动, $u_{G,t}^i = 0$ 表示机组不启动; $Q_{G,t}^i$ 表示时段*t*内发电商*i*的实际发电量,单位为MW·h。

(2) 需求响应成本

$$f_2 = k_1^i (Q_{1,t}^i)^2 + (k_2^i + p_c) Q_{1,t}^i \quad (9)$$

式中, $Q_{1,t}^i$ 为用户削减负荷。

(3) 弃风弃光成本

$$f_3 = \sum_{t=1}^T (P_{LS,t} r_{LS} + P_{WS,t} r_{WS} + P_{SS,t} r_{SS}) \quad (10)$$

式中, $P_{LS,t}$ 、 $P_{WS,t}$ 和 $P_{SS,t}$ 分别为*t*时刻的负荷削减量、弃风量和弃光量; r_{LS} 、 r_{WS} 和 r_{SS} 分别为削负荷单价、弃风惩罚单价、弃光惩罚单价。

2. 确定目标函数以及约束函数

建立期望值模型使得总成本最小作为优化函数

$$\min f = E(f_1 + f_2 + f_3) \quad (11)$$

式中, f_1 为发电机发电成本; f_2 为需求响应成本; f_3 为削负荷成本及弃风弃光成本。

约束函数包括如下方面。

(1) 针对需求响应聚合商的出力约束

削减量约束、削减持续时间和最小削减间隔时间约束、削减爬坡速率约束、削减总次数约束,前文已给出计算式。

(2) 针对系统的约束

功率平衡约束、备用约束、发电机组约束、可再生能源出力约束。

1) 功率平衡。

$$\sum_{i=1}^{N_G} Q_{G,i,t} + Q_{W,t} + Q_{S,t} = Q'_{L,t} \quad (12)$$

2) 发电机组约束。包括出力上下限约束、最小起停时间约束和爬坡约束。

3) 可再生能源发电出力约束。

$$0 \leq Q_{S,t} \leq \overline{Q_{S,t}} \quad (13)$$

$$0 \leq Q_{W,t} \leq \overline{Q_{W,t}} \quad (14)$$

式中, $\overline{Q_{W,t}}$ 为预测t时刻风电最大出力; $\overline{Q_{S,t}}$ 为预测t时刻光电最大出力。

4) 备用约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} (\overline{Q_{G,i,t}} - Q_{G,i,t}) \geq \lambda_R \cdot \max(Q'_{L,t}) \quad (15)$$

根据《电力系统技术导则》,备用容量设为最大负荷的10%,即 $\lambda_R = 0.1$ 。

算例分析

1. 算例数据

算例采用IEEE-14节点5机系统,结合某地区风电光电出力以及负荷数据求解机组组合方案。假设图4中的负荷包含传统固定负荷和需求响应负荷,其中传统固定负荷占总负荷的60%,需求响应聚合商有两家,其中聚合商1参数为 $k_1 = 0.9$, $k_2 = 80$;聚合商2参数为 $k_1 = 0.9$, $k_2 = 85$ 。

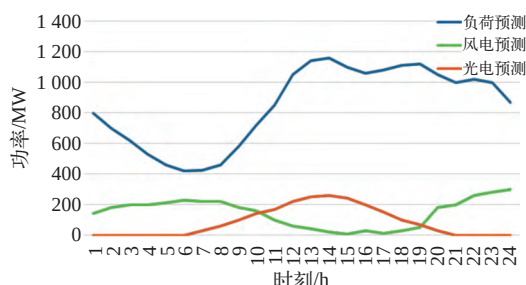


图4 负荷数据预测和风电光电数据预测

2. 仿真结果

提出考虑售电侧开放的激励型需求响应日前调度,设置4个优化场景。场景1中,负荷全部为传统固定负荷;场景2中,负荷除了传统固定负荷还

包括需求响应聚合商负荷1。场景3中,负荷除了传统固定负荷还包括需求响应聚合商负荷2。场景4中,负荷除了传统固定负荷还包括需求响应聚合商负荷1和2,两个聚合商分别占总负荷的20%。根据提出的优化模型,在Matlab中采用YALMIP和CPLEX进行建模求解,得到发电机出力、需求响应聚合商出力、削负荷和弃光弃风的仿真结果如图5~图8所示。

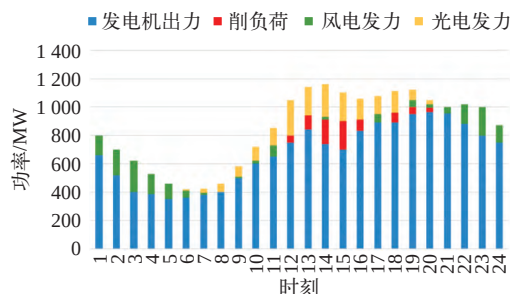


图5 未实施需求响应时的仿真结果

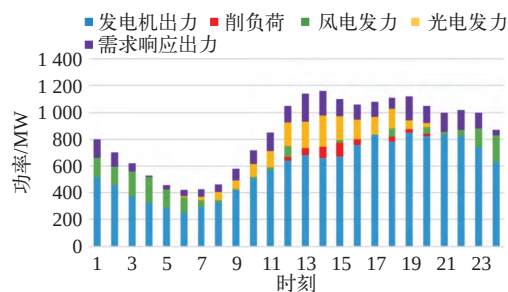


图6 需求响应聚合商1参与电力市场时的仿真结果

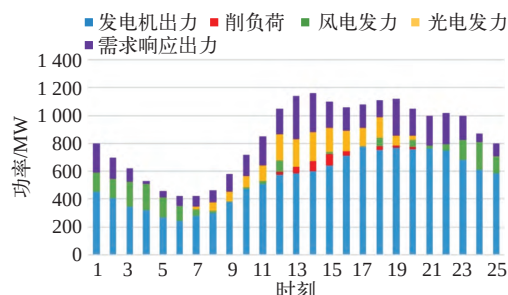


图7 需求响应聚合商2参与电力市场时的仿真结果

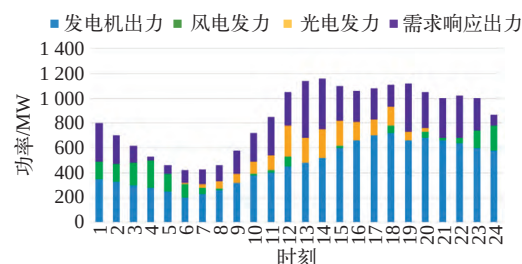


图8 需求响应聚合商1、2参与电力市场时的仿真结果

从仿真结果与成本分析表中可以看出,在场景1中,常规发电机出力无法满足负荷的需求,因

此需要削减一定量的负荷来维持功率的平衡，使得系统运行的总成本较高。用户满意度较差。在场景2、3、4中提出了加入需求响应聚合商进行平台上的电能交易，一同参与系统的优化调度，由于需求侧资源能够代替一部分高昂的发电机出力，避免了在高峰期间削减用户的负荷，用户满意度较好，且在负荷低谷时期弃风弃光电量也得到了降低。

表 场景1、2总成本对比

(单位: 万美元)

成本	场景1	场景2	场景3	场景4
发电机	185.64	148.58	129.57	88.63
需求响应	0	8.97	13.10	23.47
削负荷	124.32	78.82	51.11	0
弃风弃光成本	35.6	24.63	19.15	2.77
总成本	345.56	255.82	212.02	114.87

对计算结果分析可以得到以下结论：

场景1中，负荷高峰期发电机出力不足以供给所有负荷，需要启动发电成本较高的发电机，并削减一定量的负荷以维持供需平衡，使得总成本较高，并降低用户的可靠性。场景2中引入需求响应聚合商资源一同参与优化调度，代替了一部分价格高昂的发电机出力，避免了高峰期削减负荷，同时使得负荷低谷期的弃风弃光电量得到了降低。场景3中引入了补偿系数更高的需求响应聚合商，由于用电补偿的激励作用，更多的用户自愿削减负荷，使得总成本进一步降低。场景4中将40%的总负荷交由需求响应聚合商来调度，充分

发挥了不同用户在不同时段的需求弹性，引导用户转移用电或减少用电。由此可见，有需求响应聚合商参与的系统优化调度，可在负荷高峰期缓解发电机组出力不足的缺电情况，减少用户被迫削负荷，降低系统运行成本以及在负荷低谷期降低弃风弃光电量。

结束语

将需求响应视为一种可与传统发电机共同参与调度的资源，提出需求响应聚合商的概念，在电力零售商和需求响应用户的共同作用下参与优化调度，得到以下结论。

1) 在售电侧开放的背景下，电力零售商的大量存在给需求响应带来了更便捷的实现渠道，电力零售商管辖的电力用户数量较为庞大，故可以发挥不同用户在不同时段的需求弹性，引导用户转移用电或减少用电。

2) 需求响应聚合商参与系统优化调度，可在负荷高峰期缓解发电机组出力不足的缺电情况，减少用户被迫削负荷；减低系统运行成本；在负荷低谷期降低弃风弃光电量。参与需求响应的用户越多，总成本越低，需求响应的效果越佳，适合大量用户参与需求响应时的日前调度策略，将有利于电力市场的高效运行和良性运转，扩大电能产生的社会和环境效益。EA

(收稿日期: 2017.09.17)

(编辑: 刘群彦)

(上接第63页)

生产工艺和设备选型。系统还会根据当地能源单价，如电的峰、谷、平价格，自动计算能源购入投资情况，优化工厂资金的预算，并指导工艺调整排产，将高能耗的巴氏杀菌设备调整到电价低时开动，实现工艺排产的优化。系统还可以根据前一日或之前某个时间段内的能耗情况，预测未来的能耗，极大提高了工厂能源购入计划的编制效率，同时大大提高了能源购入计划的准确性。

对于设备运行能耗而言，更关心的是大型重点能耗设备，这些设备主要以用电为主，因此为这些设备配置了多功能电量表，可以实时采集三相电流、三相电压、有功功率、有功功率累积值和功率因数等信息，实时把握高能耗设备的能耗情况，有助于分析设备运行情况，例如制冷压缩机、空压机等。通过对能源的购入、消耗的统一

计，系统自动计算能源输送过程中的损耗，并根据预设值进行损失的分摊，实现能耗平衡功能。所有的数据都以报表的形式呈现，通过多种检索方式，可以对各类报表进行调用，并可以实现各种能耗的同比、环比，使工厂管理者掌握整个工厂的详细能源消耗情况，精确制订用能计划。所有能耗数据的浏览、查询都以Web的方式实现，即使在家也可以浏览到工厂的能耗情况。

工厂利用能源管理的各项功能，真实掌握了全厂各环节能源消耗情况，通过工艺的优化不断降低能源消耗，达到节能减排的目的。在能源日趋紧张的今天，通过能源管理系统所实现的能耗精细化管理，使企业逐步降低产品单耗，提高产品市场竞争力的同时，实现绿色生产的目标。EA

(收稿日期: 2018.03.05)

(编辑: 朱金凤)