

楼宇微电网的需求响应优化策略

文/华南理工大学广州学院建筑学院 石 瑾
华北电力大学 韦荣桃 刘俊杰

随着能源互联网的兴起和“坚强智能电网”建设的稳步推进，新能源微电网的广泛接入对电网需求响应（Demand Response，DR）提出了更高要求。需求响应能够实现用电优化、降低峰谷差、加大新能源消纳，并且能够积极参与电网间的有效互动，是“坚强智能电网”建设的核心与关键。

微电网的兴起给需求响应带来了新的挑战与机遇。已有相关研究将微电网项目引入需求响应，但较少考虑用户端的影响或楼宇微电网模型较简单，没有将楼宇微电网与需求响应紧密结合，没有充分考虑楼宇微电网对需求响应项目的积极影响以及经济效益。本文引入了楼宇微电网对需求响应的影 响，研究基于楼宇微电网可再生能源消纳调度。针对智能楼宇电力调度存在的高度非线性、多约束及高维度特征，研究楼宇微电网在价格需求响应基础上的负荷优化调度：综合智能楼宇内可中断设备、可转移设备、发电设备和储能设备等不同类型负荷用电规律，以用户日电费、用电功率峰谷差最小，使用风、光能源最多，进行多目标综合优化。将非线性约束条件进行线性化转换，改进并构建楼宇微电网优化模型，比较初始算法，该结果具有较好的用电成本节省和负荷调峰效果，提高可再生能源消纳比例。

基于楼宇微电网的需求响应特性分析

1. 楼宇微电网典型结构与特点分析

楼宇微电网是通过本地分布式微型电源或中、小型传统发电方式的优化配置，向楼宇中的

负荷提供电能的特殊电网，是一种基于传统电源的较大规模的独立系统。典型楼宇微电网结构是楼宇微电网参与需求响应，优化电价与负荷曲线的基础，楼宇微电网的典型结构如图1所示。

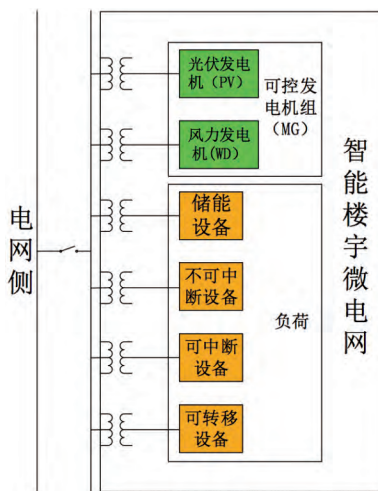


图1 楼宇微电网的典型结构

楼宇微电网结构可以支持接入网架的负荷存在多个回路，并且兼容多种类型的电源提供的电能。楼宇微电网的典型结构主要由光伏发电单元、风力发电单元、中小型可控发电机组以及负荷组成。其中，负荷可由光伏发电（PV）、风力发电（WD）组成的可控发电机组（MG）和公共电网联合对其供电。当大电网发生故障或电能质量恶劣时，开关断开，楼宇微电网进入孤岛运行状态。在电源发电能力充足的情况下，可满足对负荷的持续供电；若楼宇微电网的电源发电功率小于负荷总需求量时，则依次切除不同等级的负荷，并使用大电网与楼宇微电网联合供电模式，以满足负荷需求。

2. 基于楼宇微电网的需求响应系统构成

基于楼宇微电网的需求响应作为跨领域的电力业务，主要涉及电网侧、楼宇微电网侧和用户侧。基于楼宇微电网的需求响应系统架构框图如图2所示，主要包括需求响应服务器、需求响应运行管理系统、需求响应节点和楼宇微电网运行控制节点等。

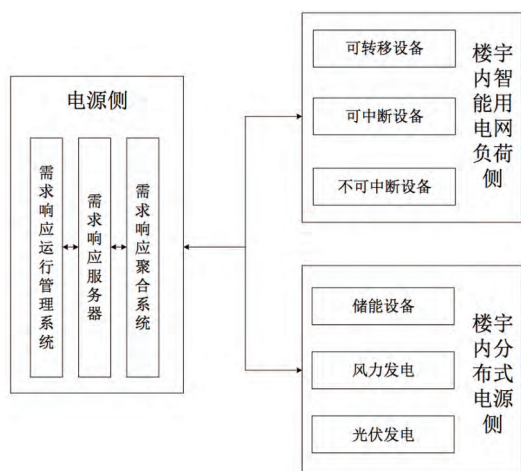


图2 基于楼宇微电网的需求响应系统框图

基于楼宇微电网的需求响应系统中，主要设备和功能描述如下：

1) 需求响应服务器。发布动态电价和负荷需求及发布需求响应事件的通知。

2) 需求响应运行管理系统。计算所有负荷的总体需求，并将需求发给自动需求响应服务器；监视需求响应系统的运行和监测需求响应的实施效果。

3) 需求响应聚合系统。对大量用户聚合后进行需求响应调度；聚合系统连接需求响应客户端与需求响应服务器，对需求响应系统发布的削减负荷进行分配。

4) 需求响应节点。向下连接和控制需求响应用户的负荷设备，主要包括固定负荷、可中断负荷和可转移负荷。

5) 楼宇微电网控制节点。向下连接和控制微电网的电源设备，包括光伏发电（PV）、风力发电机（WD）以及可控发电机组（MT）等。

在涉及楼宇微电网的需求响应系统中，需求响应聚合系统将刚性负荷、可中断负荷和可转移负荷三类负荷分别聚合为三个整体进行调整，并尽可能地优先消纳新能源微网所产生的电能，再根据各类负荷特性进行负荷侧的调度。在满足对

新能源微网电源的充分消纳条件下，需求响应聚合系统根据总负荷量的峰谷状况，首先考虑处理可中断负荷，然后统计需要调整的负荷比例，对可转移负荷按相应比例进行调度，以进一步优化削峰填谷的效果。

基于楼宇微电网的需求响应约束条件

在基于楼宇微电网的需求响应建模过程中，由于微电网的特殊性，需要充分考虑楼宇微电网本身的约束条件来建立模型。

(1) 系统约束条件

需求响应系统中负荷侧、楼宇微电网和电网侧之间必须符合功率平衡约束条件。

(2) 微网电源约束条件

本文中微网的电源主要考虑光伏发电（PV）和风力发电机（WD）两大类。不同类型的电源出力均有其功率上限。

(3) 储能约束条件

在基于楼宇微电网的需求响应中，由于储能的运行会给需求响应带来一定的影响，故需要考虑引入储能因素。

(4) 运行策略约束条件

由于本文重点在于需求响应，引入楼宇微电网主要考虑其对需求响应系统运行的优化效果，故暂不考虑楼宇微电网向大电网送电售电的情况，只考虑楼宇微电网在需求响应系统中对用户侧直接供电的情况，研究基于楼宇微电网的需求响应对于负荷曲线和市场电价的优化效果。

为了充分利用和消纳新能源，需求响应系统优先使用和消纳楼宇微电网所产生的电能。假设楼宇微电网的供电能力有限，无法完全满足负荷需求，故将楼宇微电网视为需求响应系统中对于大电网供电模式的有力补充。负荷侧在使用楼宇微电网的同时仍需要向电网公司购电。

从电价方面考虑，由于电价在不同时段的波动性，在电价高于楼宇微电网运行成本的区间，负荷侧充分优先地使用和消纳楼宇微电网产生的电能；否则，当电价低于微电网运行成本，则负荷侧完全使用电网公司的电能。

(5) 激励因素约束条件

在引入楼宇微电网情况下的需求响应中，激励报酬主要体现为用户使用楼宇微电网所节省的购电费用。

(6) 目标函数

楼宇微电网参与需求响应，首先直接从负荷和激励两方面对需求响应效果产生影响，既要最大程度地消纳微电网的风电、光伏电能，又要实现负荷曲线峰谷差值的最优化。

基于楼宇微电网的需求响应优化

引入楼宇微电网参与电力需求响应，必然给电价模式带来新的影响。在基于楼宇微电网的情况下，本文采用粒子群算法建立需求响应策略优化模型，以保证在平均电价不变的情况下最大程度地促进用户积极参与需求响应并充分消纳微电网能源。

1. 分时电价模式的需求响应优化策略

基于楼宇微电网参与负荷响应的情况下，负荷侧需求响应节点的分时电价响应策略流程如图3所示。

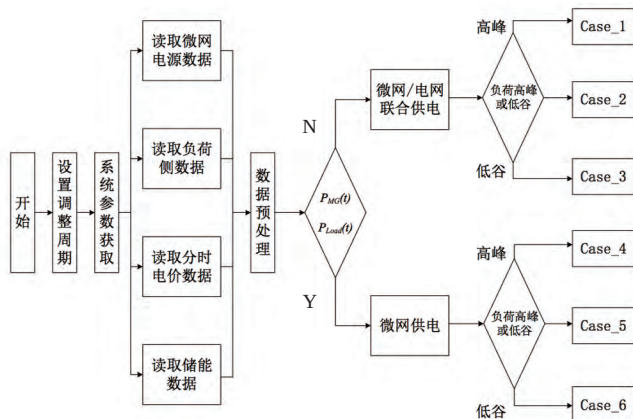


图3 分时电价模式的需求响应优化策略

在分时电价模式下，需求响应主要根据电网公司发布的分时电价信息、用户负荷需求以及微电网运行数据来进行需求响应业务，并周期性地需求响应策略调整。需求响应策略可以按小时或峰平谷时段来设置周期，每个周期首先从负荷侧、电网侧和楼宇微电网侧读取所需数据信息：①从负荷侧统计用电负荷需求量。②从电网侧获取电网公司发布的分时电价信息。③从楼宇微电网侧读取楼宇微电网的运行数据（如风电、光伏以及储能设备放电的输出功率）。

为了在进行负荷响应的同时兼顾对楼宇微电网新能源的充分消纳，首先直接根据楼宇微电网出力的功率和运行成本选择供电方式。之后对各类用电负荷进行需求响应优化调整（比如可转移负荷和可中断负荷）。

1) 楼宇微电网出力小于负荷需求，则采用微网/公网联合供电模式。Case_1：负荷高峰时段，楼宇微电网电源、储能设备和公网共同对负荷供电；Case_2：负荷平时段，楼宇微电网和公网共同对负荷供电，储能设备无充放；Case_3：负荷低谷时段，楼宇微电网和公网共同对负荷供电，并对储能设备充电。

2) 楼宇微电网出力大于负荷需求，则采用微网独立供电模式。Case_4：负荷高峰时段，微网和储能设备共同对负荷供电；Case_5：负荷平时段，微网对负荷供电，储能设备无充放；Case_6：负荷低谷时段，微网对负荷供电，并对储能设备充电。

2. 实时电价模式的需求响应优化策略

在实时电价机制下，基于楼宇微电网的需求响应节点优化策略如图4所示。

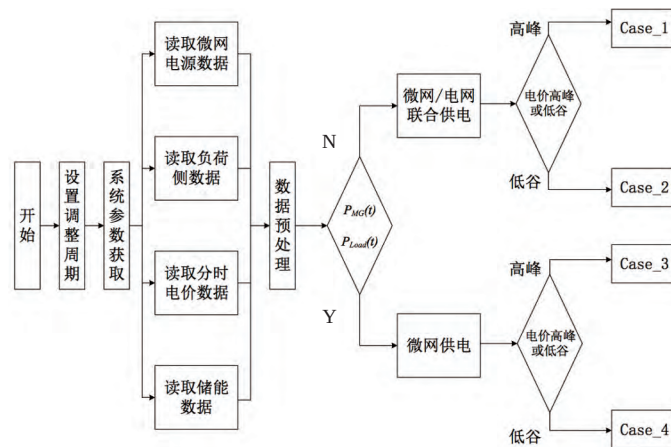


图4 实时电价模式的需求响应优化策略

对于储能资源的工作模式，当市场的实时电价低于平均电价，储能设备进行充电；否则，若市场电价高于平均电价，则储能设备对负荷供电。通过对楼宇微电网的电能消纳进行激励，促使负荷侧更倾向于优先使用微电网电能，在此基础上再进行第二次需求响应优化。

1) 楼宇微电网出力小于负荷需求，则采用微网/公网联合供电模式。Case_1：电价高于平均价格时，微网电源、储能设备和公网共同对负荷供电；Case_2：低于平均价格的时段，楼宇微电网和公网共同对负荷供电，并对储能设备充电。

2) 楼宇微电网出力大于负荷需求，则采用微网独立供电模式。Case_3：电价高于平均价格时段，微网和储能设备共同对负荷供电；Case_4：电价低于平均价格时段，楼宇微电网对负荷供

电,并对储能设备充电。

由于实时电价的波动性和多变性,基于楼宇微电网的需求响应节点要实时跟踪比较实时电价与楼宇微电网运行成本。因此,实时电价模式下需求响应节点对响应策略的调整周期间隔较短,以15 min~1 h为一个周期进行设置。实时电价下的需求响应节点也采用双层响应的策略。首先实时跟踪计算微网运行成本,并与电网公司发布的实时电价进行比较,当市场的实时电价低于微网供电成本,则优先考虑使用公网供电;否则,若市场电价高于微网供电成本,就优先使用消纳楼宇微电网电能。通常情况下,市场电价在大部分时间里高于微网供电成本。这使得用电方更倾向于优先使用楼宇微电网电能,在楼宇微电网功能不足时再使用公网供电。

仿真算例

为了验证分时电价和实时电价模式下基于楼宇微电网的需求响应优化效果,本节仍然采用图4所示的需求响应系统简化结构进行仿真验证。其中,需求响应仿真条件中采用了风力发电、光伏发电以及可控发电机组作为间歇性波动功率的输出电源,但暂时不考虑储能因素的影响。仿真条件设定风力发电额定功率为30 MW,光伏发电额定功率为50 MW,负荷侧的负荷总需求量为50~140 MW。优化周期设置为30 min,24 h内共计 $N=48$ 个优化周期。

分时电价模式下的需求响应优化结果如图5和图6所示;实时电价模式下的需求响应策略优化结果如图7和图8所示。

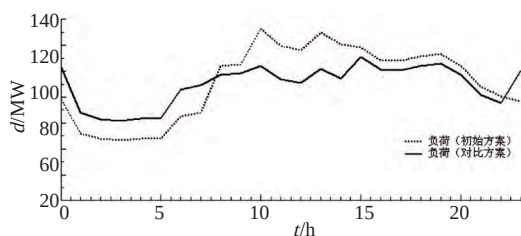


图5 分时电价模式的负荷优化效果

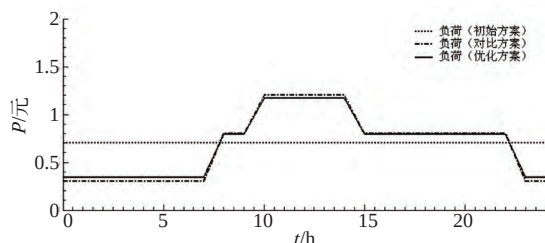


图6 分时电价优化效果

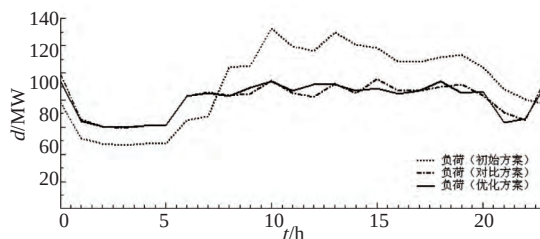


图7 实时电价模式的负荷优化效果

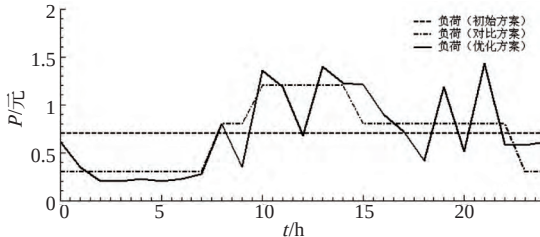


图8 实时电价优化效果

图5中可以看出,实施分时电价模式下基于楼宇微电网的需求响应优化,可以实现良好的负荷转移效果。结合图5和图6,可见本文提出的优化方案能够很好地实现分时电价的优化,优化得到的三段价格的平均价格和实施响应前的平均价格保持一致,且需求响应后的电力负荷峰谷差有明显改善。

图7中实线对应的实时电价模式可以实现良好的负荷转移,峰谷差得到了优化,说明本文提出的实时电价模式下基于楼宇微电网的需求响应优化可以实现良好的负荷转移效果。图7和图8中电价策略和相应的电力负荷波动情况都有明显改善,进而验证了基于楼宇微电网的需求响应优化方法在调节实时电价方面的有效性。在需求响应中,储能资源的充分运用起到了突出的作用:①负荷低谷时段,储能设备进行充电,相当于起到增加负荷的作用。②负荷高峰时段,储能放电则相当于降低了负荷峰值。在此基础上进行需求响应,可进一步优化总体负荷曲线。

结束语

本文在需求响应系统中引入了楼宇微电网作为参与因素,设计了基于楼宇微电网的需求响应系统的原理架构,并提出了基于楼宇微电网的需求响应建模原则与方法。在此基础上,分别建立了基于楼宇微电网的分时电价和实时电价两种模式下需求响应优化策略,利用仿真算例验证了所提出的需求响应优化模型的合理性和有效性。仿真计算结果表明,分时电价和实时电价两种模式中,楼宇微电网参与需求响应都能进一步优化系统负荷曲线和市场电价曲线并促进楼宇微电网能源的充分消纳。EA