

基于 GridLAB-D 的微电网广义需求响应建模与控制

漆淘懿¹, 惠红勋¹, 徐立中², 马翔², 丁一¹

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 电力系统中光伏等分布式可再生能源快速发展, 分布式屋顶光伏成为新型智能微电网的典型特征。为提高含高比例光伏微电网的稳定性和经济性, 提出了利用居民侧灵活负荷调节以及储能设备充放电来实现的广义需求响应, 从而增加微电网内光伏波动性出力的消纳, 降低智能微电网的运行成本。以居民住宅微电网为研究对象, 基于连续仿真软件GridLAB-D建立了住宅模型、光伏发电模型、储能设备模型、气候和电力市场模型等, 并提出了广义需求响应中灵活负荷和储能设备的控制算法。通过IEEE 13节点测试系统模型, 验证了广义需求响应在智能微电网中的实施能够有效降低弃光率、节约用户用电成本, 并能够协助主网系统减小负荷峰谷差。

关键词: 光伏发电; 微电网; 需求响应; 储能; GridLAB-D

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2020.07.001

0 引言

电力系统中以风电、光伏为代表的可再生能源渗透率不断提高, 但是其发电受环境影响大, 具有间歇性和波动性^[1]。为了更好地消纳可再生能源, 减少可再生能源发电对电力系统的不利影响, 以工业园区、居民住宅区为代表的智能微电网快速发展^[2]。微电网由负荷、分布式电源、储能设备等组建而成, 通常具有独立运行和联网运行两种运行模式, 主要特点是规模小、分散性好和独立性高^[3]。

快速发展的信息通信技术使微电网具有了更多元化的运行方案^[4], 即通过调整负荷资源用电及储能设备充放电实现需求响应^[5] (demand response, DR), 协助微电网消纳可再生能源出力, 同时降低居民用电成本。需求响应的实现方式有价格机制或激励机制, 引导用户改变其固有用电模式, 实现电网和用户间的互动^[6]。此外, 增加的储能系统打破了电力生产过程中的供需同时性限制, 有助于平抑可再生能源发电的波动并促进其消

纳, 减小系统峰谷差, 保障电网安全稳定运行^[7]。

文献[8]介绍了一个含可再生能源的公园微电网项目, 公园负荷可从微电网内分布式发电设备和外部电网获取电能, 通过需求响应技术实现公园负荷最大程度的独立运行。文献[9]分析了多种天气下的光储微电网模型, 对储能电池进行优化配置, 结果表明需求响应能够降低微电网所需的电池容量, 提高微电网运行效益。文献[10]对含光伏的微电网系统开展研究, 以最大光伏消纳量和最低运行成本为目标进行优化, 结果表明储能设备调节比负荷调节更有优势。

然而, 目前针对光储微电网的研究, 其需求响应负荷模型大多以可调节范围表示, 模型较为粗糙且难以分析对用户个体的影响。大多数研究通常按照理想情况控制负荷响应, 没有考虑实际中负荷的可调度能力。此外, 之前的研究大多只关注天气情况对光伏的影响, 却忽略了天气对居民负荷的影响, 例如空调等温控负荷受气温影响较大。在研究时序方面, 大多仅关注优化和控制方法, 仿真为时间断面, 忽视了连续长时间动态过程间的相互影响, 难以应用于实际场景分析。

针对上述问题, 本文基于GridLAB-D构建了在实时电力市场场景下含光伏、储能、可调节负荷的微电网, 建立了光伏、储能设备、可调节负荷、天气等精细模型, 通过广义需求响应控制方法, 降低微电网系统的弃光率和用户用电成本。同时, 通过维持微电网

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目“大规模负荷资源参与需求响应商业模式与关键技术研究”(5211JH1900M7)。

Supported by State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211JH1900M7) .

[引文信息] 漆淘懿, 惠红勋, 徐立中, 等. 基于GridLAB-D的微电网广义需求响应建模与控制[J]. 供用电, 2020, 37(7): 3-10.
QI Taoyi, HUI Hongxun, XU Lizhong, et al. Modeling and control of generalized demand response in micro-grids based on GridLAB-D [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 3-10.

内的发用电平衡，减小微电网功率波动对主网的不利影响。

本文所提模型与算法利用GridLAB-D软件仿真完成，具有以下优势：模型丰富，可以对微电网精细建模；算法高效，能够完成长时间连续仿真；开发简便，可以添加对广义需求响应的控制方法。

1 基于GridLAB-D的微电网广义需求响应建模方法

GridLAB-D是美国太平洋西北国家实验室和工业界联合研制开发的一款专门针对智能电网的开源性仿真软件^[11]。能够对智能电网中的潮流计算、电网规划、无功优化、电力市场运行和新能源接入的可靠性等多方面的问题进行仿真分析^[12]。国内对于GridLAB-D的起步较晚，文献[13-15]是早期涉及该软件的文章，介绍了GridLAB-D的基本功能和应用，并利用此软件建立了小型配电系统模型，验证了需求响应在削峰填谷、降低电价方面的效果。

本小节基于GridLAB-D的主要模块建立了智能微电网模型，包括住宅及负荷模块、光伏发电及储能模块、天气模块、电力市场模块、数据模块、潮流计算模块。

1.1 居民住宅及负荷建模

等效热参数（equivalent thermal parameters, ETP）模型是常用的居民住宅模型，见图1^[16]。

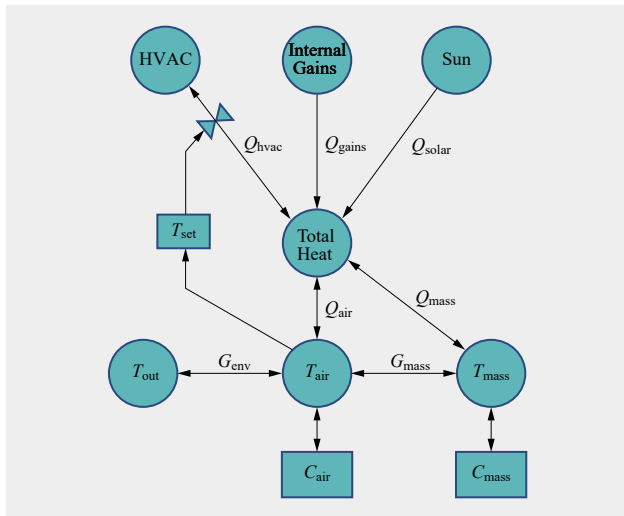


图1 等效热参数模型

Fig.1 Equivalent thermal parameters model

等效热参数模型计及了天气情况、住宅热参数、太阳辐射、空调设定温度多种因素的影响，可以表示为：

$$\frac{dT_{air}}{dt} = \frac{1}{C_{air}} [T_{mass} G_{mass} - T_{air} (G_{env} + G_{mass}) + Q_{air} + T_{out} G_{env}] \quad (1)$$

$$\frac{dT_{mass}}{dt} = \frac{1}{C_{mass}} [G_{mass} (T_{air} + T_{mass}) + Q_{mass}] \quad (2)$$

式中： T_{air} 为室内的温度； C_{air} 为空气的热容； T_{mass} 为空调热质温度； G_{mass} 为空调与空气之间的热导； G_{env} 为内部空气与外界之间的热导； Q_{air} 为室内空气热通量； T_{out} 为室外温度； C_{mass} 为空调热质的热容； Q_{mass} 为空调热质热通量。

等效热参数模型（ETP）可以设定居民住宅及内部负荷的具体参数，包括住宅面积、空调制冷温度等。其中，空调和热水器是温控物理模型，其余负荷通常采用端电压的二次函数等值模型，即ZIP模型（Z表示恒定阻抗、I表示恒定电流、P表示恒定功率），见图2^[17]。

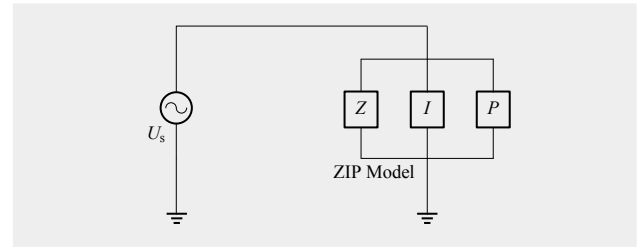


图2 端电压的二次函数等值模型

Fig.2 ZIP model

ZIP负荷模型可以表示为：

$$P_i = \frac{|U_a|^2}{|U_n|^2} S_n Z_{\%} \cos(Z_{\theta}) + \frac{|U_a|}{|U_n|} S_n I_{\%} \cos(I_{\theta}) + S_n P_{\%} \cos(P_{\theta}) \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{|U_a|^2}{|U_n|^2} S_n Z_{\%} \sin(Z_{\theta}) + \frac{|U_a|}{|U_n|} S_n I_{\%} \sin(I_{\theta}) + S_n P_{\%} \sin(P_{\theta}) \quad (4)$$

$$1 = Z_{\%} + I_{\%} + P_{\%} \quad (5)$$

式中： P_i 为负荷有功功率； Q_i 为负荷无功功率； S_n 为设定总功率； U_a 为实际电压； U_n 为额定电压； $Z_{\%}$ 为恒阻抗负荷所占比例； Z_{θ} 为恒阻抗负荷的幅角； $I_{\%}$ 为恒电流负荷所占比例； I_{θ} 为恒电流负荷的幅角； $P_{\%}$ 为恒功率负荷所占比例； P_{θ} 为恒功率负荷的幅角。在GridLAB-D建模中，需依次设定ZIP负荷总功率，以及恒阻抗、恒电流和恒功率负载的占比及相应的功率因数。

1.2 光伏发电及储能建模

光伏输出功率 P_{PV} 是由标准条件下的输出功率、光照强度和环境温度得到的^[18]：

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_{STC})] \quad (6)$$

式中： P_{STC} 为标准条件下光伏额定输出功率； G_c 为工作点的辐射强度； G_{STC} 为标准辐射强度； k 为功率温度系数； T_c 为工作点的电池温度； T_{STC} 为电池标准工作温度。

在GridLAB-D中，光伏采用阵列模型，支持光伏的最佳跟踪策略，同时计及温度对光伏的影响，在潮流计算时将其视为负的负荷。建模时，用户需要设定光伏板

的材料类型、光伏板面积、光伏转换效率等参数。

储能设备以蓄电池为例，其储存电量由荷电状态 $S_{\text{soc}}(t)$ 衡量， t 时刻蓄电池的荷电状态值与前一时刻的 $S_{\text{soc}}(t-1)$ 和前一时刻段的功率有关^[9]：

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) - \frac{E(t-1)}{C} \quad (7)$$

式中： $E(t-1)$ 为前一时刻的能量变化； C 为电池的容量。在 GridLAB-D 中对电池建模时，需要设定电池容量、电池初始能量、电池最高工作电压、最大工作电流、最大充放电功率以及充放电效率等参数。

1.3 天气和电力市场建模

天气是影响电力系统的一个重要因素，负荷、光伏设备、输电线路等都会受天气影响。GridLAB-D 中包含了天气模块，本文使用典型气象年的天气数据，其中包括温度、湿度、辐射强度、风速等数据。

电力市场是指电能生产者和电能消费者之间通过协商、竞价等方式就电能及相关产品确定价格和数量后进行交易的一种机制。GridLAB-D 中电力市场有两种模式：一种是双向的交易竞价市场；另一种是单向的电力市场，市场只向用户发布实时电价，用户不参与竞价，只根据接收的实时电价做出响应。

1.4 运行数据分析

GridLAB-D 中数据记录模块主要用于输入仿真数据和输出仿真结果，其输入输出均有多种方式。常见的输入数据有天气情况、实时电价、电器的使用时间，其设定的具体时间均可以精确到秒。数据输入主要有 Player 和 Schedule 两种方式：Player 可以给某一参数设定其关于时间的变化情况，常用于设定边界条件；Schedule 主要用于输入有重复特征的数据，例如电灯、洗衣机等电器的使用时间段。

数据输出主要有 Recorder 和 Collector 两种方式：Recorder 主要用于输出指定时间的数据，可以设置相应的输出条件；Collector 主要用于收集符合某一条件的一类数据，例如住宅室内温度，并对这些数据进行求和、求最值等处理。

2 基于 GridLAB-D 的广义需求响应控制策略

为实现降低微电网弃光率和用户用电成本的目标，本文提出针对灵活负荷和储能设备的两阶段控制策略，维持微电网与主网间联络线功率在每个时段的恒定，避免微电网内用户购电成本波动的风险。

具体来说，运行前根据负荷、光伏预测值以及实时电价，确定下一时段从主网购买的电量，并得到微电网内可转移负荷需求响应量；运行中根据负荷、光伏及联

络线功率实际值，确定储能设备充放电状态。

2.1 运行前灵活负荷聚合控制策略

运行前灵活负荷聚合控制策略见图3。

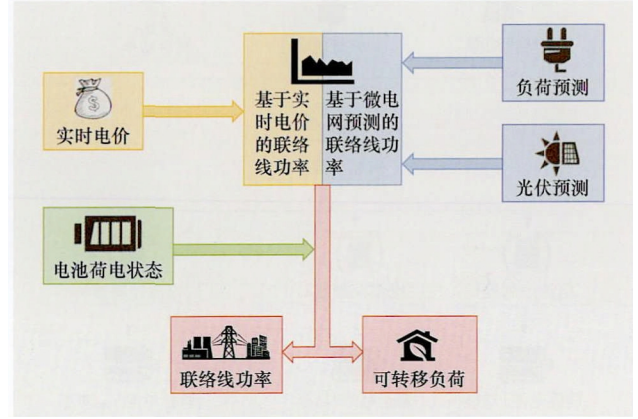


图3 运行前灵活负荷聚合控制策略

Fig.3 The aggregation control strategy of flexible load

根据已发布的实时电价、负荷预测功率、光伏预测功率以及电池荷电状态，计算下一时段联络线功率和可转移负荷量：

$$P^{\text{tie-line}}(t) = P_{\text{avg}}^{\text{tie-line}}(t) \times \sqrt{M_{\text{avg}} / M_{\text{rt}}(t)} \quad (8)$$

$$P_{\text{DR}}(t) = P^{\text{tie-line}}(t) + P_{\text{PV}}^{\text{D}}(t) - P_{\text{load}}^{\text{D}}(t) - P_{\text{bat}}^{\text{D}}(t) \quad (9)$$

$$|P_{\text{bat}}^{\text{D}}(t)| \leq \overline{P_{\text{bat}}} \times \frac{S_{\text{soc}}(t)}{R_{\text{ef}}(t)} \quad (10)$$

$$P_{\text{DR}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{DR}}} P_{\text{DR},i}(t) \quad (11)$$

式中： $P^{\text{tie-line}}(t)$ 为微电网和电网之间的联络线功率； $P_{\text{avg}}^{\text{tie-line}}(t)$ 为平均微电网和电网之间的联络线功率； M_{avg} 为平均电价； $M_{\text{rt}}(t)$ 为实时电价； $P_{\text{DR}}(t)$ 为负荷转移总功率； $P_{\text{PV}}^{\text{D}}(t)$ 为光伏预测出力； $P_{\text{load}}^{\text{D}}(t)$ 为负荷预测功率； $P_{\text{bat}}^{\text{D}}(t)$ 为电池预测功率； $\overline{P_{\text{bat}}}$ 为电池最大功率； $S_{\text{soc}}(t)$ 为电池荷电状态； $R_{\text{ef}}(t)$ 为电池荷电状态参考值； $P_{\text{DR},i}(t)$ 为第 i 个灵活负荷的功率； N_{DR} 为灵活负荷数量。

式（8）可以计算得到基于实时电价的联络线功率，其与实时电价负相关，即电价越高，微电网从主网购买的电量越少。式（9）通过负荷预测量、光伏预测量和电池功率，计算出下一时段执行的可转移负荷量。此外，由于电池功率与电池荷电状态有关，需满足式（10）的可调度能力约束。根据式（11）聚合灵活负荷功率得到需求响应总量。

2.2 运行中储能设备聚合控制策略

在实际运行过程中，光伏出力和负荷与运行前预测

值会有偏差,为维持运行中联络线功率恒定,需实时调整储能设备功率,具体的控制策略见图4。

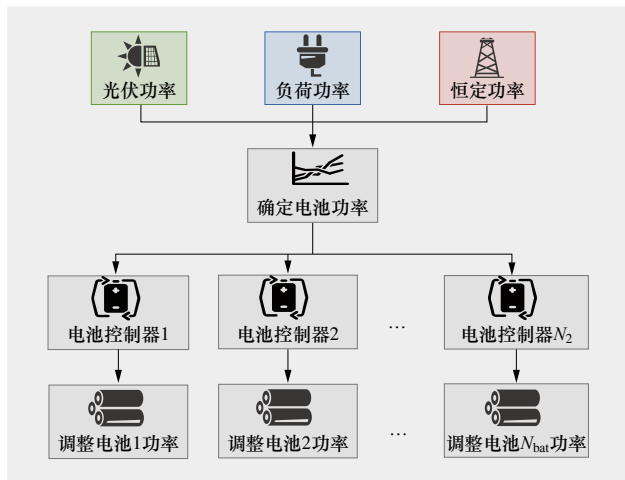


图4 储能设备聚合控制策略

Fig.4 Aggregation control strategy of energy storage devices

通过运行前确定的微电网与电网间的联络线功率和需求响应负荷量,以及实时光伏出力和负荷功率,计算电池充放电功率:

$$P_{\text{bat}}(t) = P^{\text{tie-line}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{load}}(t) - P_{\text{DR}}(t) \quad (12)$$

$$P_{\text{bat}}(t) = \sum_{j=1}^{N_{\text{bat}}} P_{\text{bat},j}(t) \quad (13)$$

式中: $P_{\text{bat}}(t)$ 为电池实时总功率; $P_{\text{PV}}(t)$ 为光伏实时功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为实时负荷功率; $P_{\text{DR}}(t)$ 为负荷转移功率; $P_{\text{bat},j}(t)$ 为第 j 块电池的实时功率; N_{bat} 为电池总数量。

上述模块均可通过GridLAB-D中Runtime建模, Runtime是一种C++开发模式,利用MinGW平台进行开发,直接在GLM文件中添加用户需要的模块或功能^[19]。

3 算例分析

3.1 测试系统

本文针对拥有高渗透率光伏发电且参与并网的微电网开展研究,微电网的运行机制为“自发自用,电网调剂”,微电网只向电网购电,不向电网售电。微电网的架构基于IEEE 13节点测试系统,如图5所示。将各节点的负荷等效为居民负荷,按原网络的负荷比例分布在各节点,一共设置居民用户257户,具体分配见表1。

表1 用户分布情况

Table1 The distribution of residential users

节点编号	634	645	646	652	671	675	692	611	合计
用户数量	30	16	16	11	93	64	16	11	257

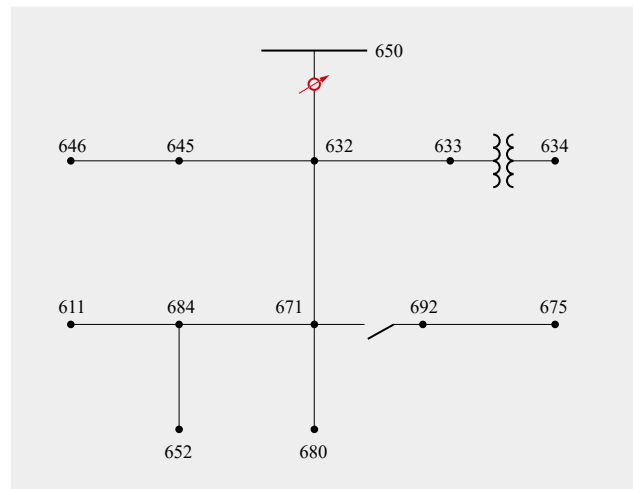


图5 IEEE 13节点系统

Fig.5 IEEE 13 node test feeder

仿真时间为夏季8月的一天,使用得克萨斯州圣安东尼奥的天气数据^[20]。电力交易由聚合商在电力市场中进行,使用澳大利亚昆士兰电力市场的实时电价^[21],昆士兰和圣安东尼奥的天气类似,符合实际情况。

居民用户的房屋平均面积为1500 ft²(约130 m²),在1100 ft²到1900 ft²间平均分布,总住宅面积380850 ft²(约35000 m²)。制冷设备为空调,夏季制冷温度平均设定值为79°F(约26°C),在77~81°F范围内平均分布。房屋内除了空调和电热水器外,其余用电设备设置为ZIP负荷。微电网一天的用电量约18 MWh,峰值功率约1.2 MW^[22]。

为保证需求响应的参与度,不影响用户的舒适度,参与需求响应的负荷为储水式电热水器、洗衣机等灵活负荷。灵活负荷的最大功率为200 kW,约占峰值功率的17%,每天的总用电量为2 MWh,约占总用电量的12%^[23]。

分布式光伏设备安装在居民建筑屋顶,光伏面积约为住宅面积的25%,平均每户有32 m²的光伏设备,光伏总面积8227 m²。光伏板材料为单晶硅,光伏转换效率为20%,总装机容量1650 kW。根据光伏装机比例在光伏设备附近配置蓄电池,总容量为4920 kWh,电池的充放电效率为86%。蓄电池和光伏设备均通过逆变器连接到微电网中,逆变器的转换效率为90%^[24]。

本研究将分析微电网中配置光伏发电后和实施广义需求响应后的运行情况,同时比较储能设备和灵活负荷在广义需求响应中的不同作用,如表2所示。

表2 仿真算例

Table2 Simulation cases

算例	光伏发电	储能设备	需求响应
算例1	无	无	无

续表

算例	光伏发电	储能设备	需求响应
算例2	有	无	无
算例3	有	有	无
算例4	有	有	有

图6展示了仿真当日的气温和太阳辐射强度，最高气温96°F（约35.6°C）。

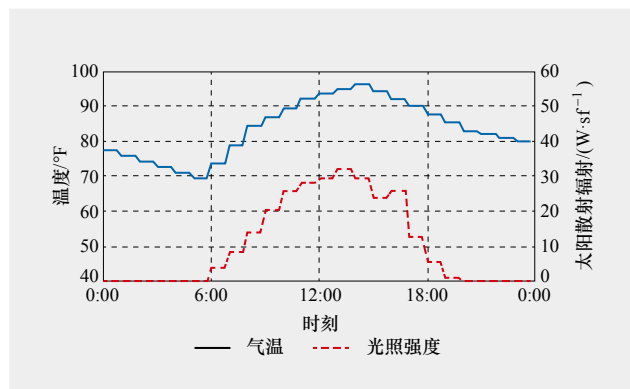


图6 天气情况

Fig.6 Climate conditions

图7为当日电力市场的实时电价，电价在18:45达到最高值为132.52 澳元/MWh；在6:30左右电价最低，为41.89 澳元/MWh。最低电价仅为最高电价的32%，通过调整负荷的用电时间能够减少高峰电价时期的用电量，降低用电成本，可见实施广义需求响应的重要意义。

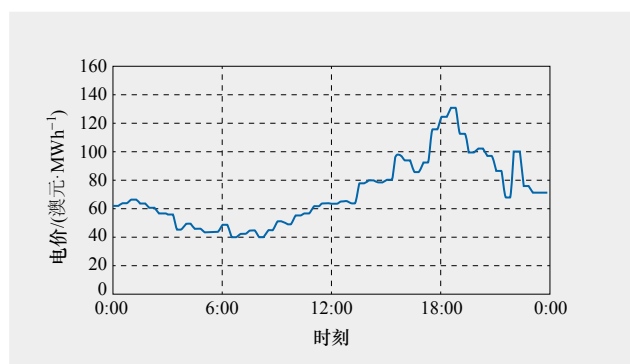


图7 实时电价

Fig.7 Real-time prices

居民侧的负荷高峰通常集中在19:00左右，在8:00和12:00也会出现小的用电高峰。根据上述居民侧的用电规律设置了图8的微电网基础功率，即不含灵活负荷的功率。

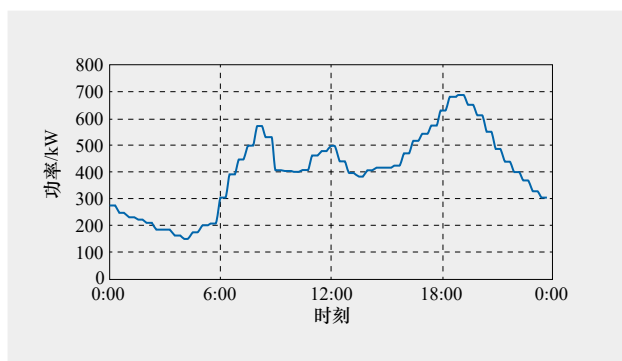


图8 微电网基础功率

Fig.8 The base power of micro-grids

3.2 仿真结果分析

仿真结果分别见图9至图12。算例1是微电网的原始情况，和图8相比，白天的联络线功率由于空调负荷的增加明显上升。在14:30时，空调功率达到了573 kW，占到了总功率977 kW的58.6%。白天负荷的增加，也造成了微电网峰谷差进一步扩大到了1 097 kW。除此之外，由于空调的频繁启停，联络线功率的波动比较剧烈，这些不利因素均会影响电力系统的稳定运行。

算例2在微电网中配置了光伏发电，从图10可以看出，8:00到16:00期间光伏出力较大，因此联络线功率非常低，甚至出现联络线功率为0的时段。一方面缓解了夏季午后天气炎热时期的电力紧张问题；另一方面，由于光伏所发的多余电能无法上网而出现了弃光现象。晚高峰时期，光伏几乎没有出力，联络线功率较高，微电网仍然要以高额费用在高电价时期购买大量电能。

算例3在算例2的基础上配置了蓄电池，其中电池功率大于0时表示电池放电，反之表示电池充电。微电网控制电池储存光伏所发的多余电能，同时控制电池参与广义需求响应，在低电价时期储存电能，在高电价时期使用。从图11可以看出，加入电池后，避免了弃光现象；和算例2相比，显著降低用电高峰时期的功率而提高低谷时期的功率，18:00时的功率从1 024 kW降低到了417 kW，5:00时的功率从187 kW提高到了438 kW，起到了削峰填谷的作用。除此之外，电池的控制算法使微电网的功率更加平稳，减少了光伏出力波动和空调负荷间歇性启停造成的联络线功率波动。

算例4在算例3的基础上，增加了灵活负荷参与广义需求响应，灵活负荷功率大于0时表示增加负荷功率，反之代表削减负荷功率。从图12可以看出，相较于算例3，灵活负荷加入后，广义需求响应的调节能力增强，提高了负荷的转移能力。通过将晚高峰高电价时期的部分灵活负荷向其他低电价时期转移，18:00时的功

率从417 kW降低到75 kW, 5:00时的功率438 kW提升到635 kW, 进一步降低了用户的用电成本。

由于没有对空调进行调控, 4种算例中室内温度几乎相同, 如图13所示。居民的住宅平均温度一直保持在79°F附近, 除了在4:00到5:45时段由于室外气温降低室内温度有一定降低, 其余时段的室内温度上下波动都非常小, 有效地保障了用户的舒适度。

通过图14可以对比4个算例中微电网和主网间的联络线功率, 可以发现含光伏的微电网中, 广义需求响应在降低联络线功率、维持联络线功率稳定方面的显著作用。

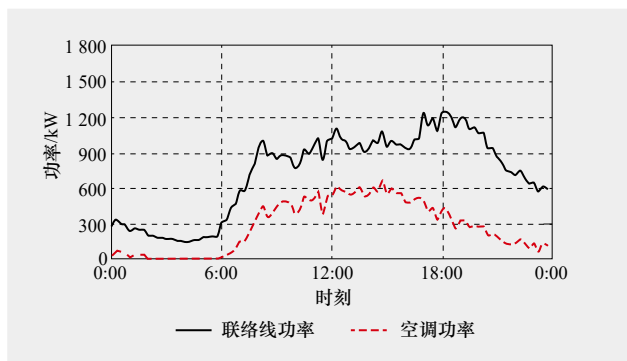


图9 算例1仿真结果

Fig.9 The simulation result of case 1

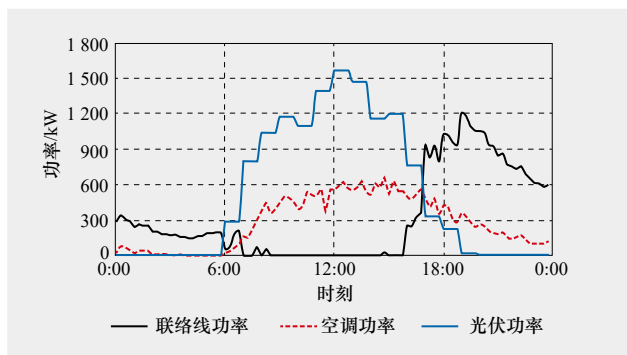


图10 算例2仿真结果

Fig.10 The simulation result of case 2

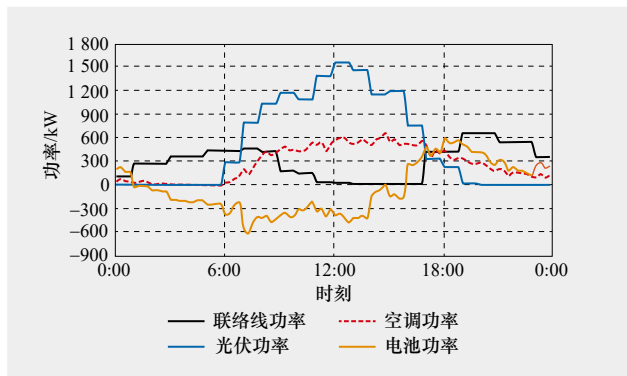


图11 算例3仿真结果

Fig.11 The simulation result of case 3

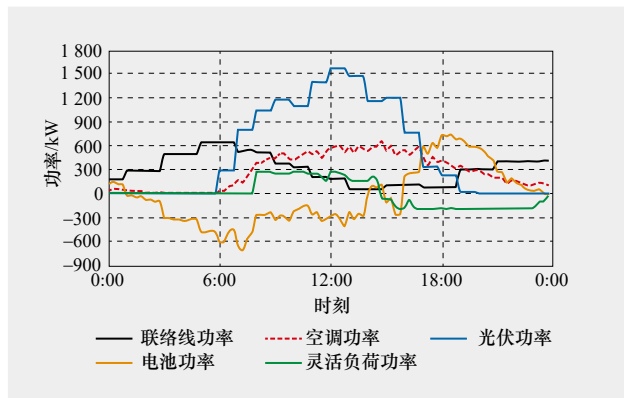


图12 算例4仿真结果

Fig.12 The simulation result of case 4

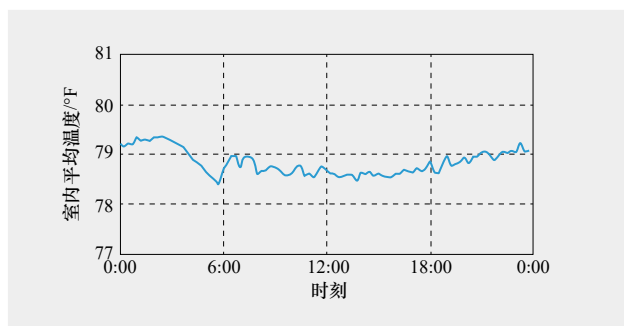


图13 室内平均温度

Fig.13 The average temperature of houses

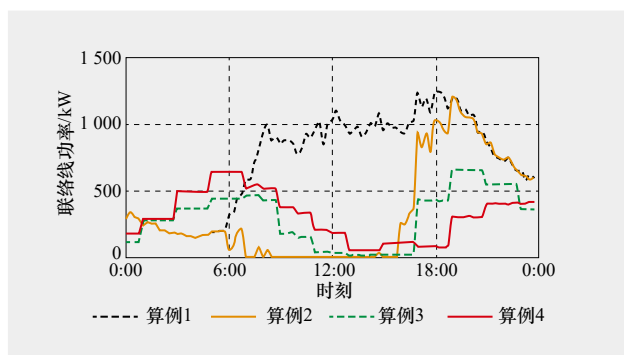


图14 算例对比

Fig.14 The comparison of cases

表3是不同算例中的微电网购电量、电费和最大、最小功率的比较。在微电网中配置光伏发电后, 能够有效减少微电网的购电量, 微电网的购电量从17.72 MWh降低到了7.8 MWh, 电费从1 383.64澳元减少到719.73澳元。引入广义需求响应之后, 电池参与、电池和灵活负荷共同参与的两个算例, 购电量分别为7.2 MWh、7.4 MWh, 电费从719.73澳元分别减少到539.62、470.16澳元。

由于电池充放电和逆变器的损耗, 购电量减少幅度不大。而加入灵活负荷后, 因为电热水器的预加热, 储水罐中热水的热量损耗增加, 购电量反而有所增加。尽

管后期的购电量减少不明显,但是购电费用的降低都比较显著。

由此可见,在微电网中实施广义需求响应,能够提高光伏利用率,减少高峰时期购电量,具体效果和参与的负荷种类与负荷量有关。电池相较于灵活负荷,参与方式更加灵活,调节更加迅速,同时具备维持功率稳定的作用。

表3 仿真算例结果比较

Table3 The comparison of simulation results

比较	购电量/ MWh	电费/澳元	最大功率/ kW	最小功率/ kW
算例1	17.42	1 383.64	1 240.66	143.0
算例2	7.80	719.73	1 019.82	0
算例3	7.20	539.62	440.00	7.55
算例4	7.40	470.16	636.82	49.63

4 结语

本文利用GridLAB-D软件,对基于IEEE 13节点的微

电网进行了详细地建模,在电力市场背景下,以低弃光率、低购电费用和用户最大舒适度为目标,利用储能设备和灵活负荷参与的广义需求响应,对微电网进行了连续仿真。仿真结果表明,广义需求响应的参与能够有效降低微电网的购电费用,提高光伏利用率。

广义需求响应的不同参与对象会有不同的效果,需要根据实际情况进行合理配置。储能设备有以下优点:能够维持微电网功率稳定,减少光伏发电波动和大负荷启停对电网的影响;参与形式更加灵活,可以在各个时刻参与,参与的功率和容量都可以连续调节。

灵活负荷的效果有限,但是不需要额外增加设备,可以作为储能设备很好的补充。提高负荷转移能力,能够应对更加复杂的情况,或者在相同转移能力的情况下减少储能设备的容量,节约成本;在电池荷电状态较低或较高时,通过调整灵活负荷功率,能够有效解决电池的过充过放问题,延长电池的使用寿命,保证储能设备长期具备调节能力。

DU

参考文献

- [1] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (5): 69-74. YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43 (5): 69-74.
- [2] 肖朝霞, 贾双, 朱建国, 等. 风光储微电网并网联络线功率控制策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (15): 169-179. XIAO Zhaoxia, JIA Shuang, ZHU Jianguo, et al. Tie-line power flow control strategy for a grid-connected microgrid containing wind, photovoltaic and battery [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (15): 169-179.
- [3] 张伟. 分布式发电与微电网技术在电网中的应用 [J]. 能源技术与管理, 2019, 44 (5): 178-181.
- [4] HUI H X, DING Y, SHI Q X, et al. 5G network-based internet of things for demand response in smart grid: a survey on application potential [J]. Applied Energy, 2020, 257 (1): 113972.
- [5] HUI H X, DING Y, LIU W D, et al. Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners [J]. Applied Energy, 2017, 196 (12): 218-228.
- [6] 谢康, 张凯杰, 梁开宁, 等. 电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索 [J]. 电力需求侧管理, 2019, 21 (3): 7-10. XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21 (3): 7-10.
- [7] 杨效嘉, 杨俊友. 微电网电池储能消纳弃风优化模型 [J]. 分布式能源, 2018 (6): 25-30. YANG Xiaojia, YANG Junyou. Optimization model of wind power consumption by energy storage in micro-grid [J]. Distributed Energy, 2018 (6): 25-30.
- [8] KEREKES R, HARTMANN B. Demand-side management in renewable energy park [C] //2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE). Budapest, Hungary. 2017: 1-6.
- [9] 赵波, 包侃侃, 徐志成, 等. 考虑需求侧响应的光储并网点微电网优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (21): 5465-5474. ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (21): 5465-5474.
- [10] 彭政, 崔雪, 王恒, 等. 考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (22): 63-69. PENG Zheng, CUI Xue, WANG Heng, et al. Research on the accommodation of photovoltaic power considering storage system and demand response in microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (22): 63-69.
- [11] GridLAB-D Project Team. GridLAB-D simulation software [EB/OL]. [2020-04-05]. <http://www.Gridlabd.org>.
- [12] CHASSIN D P, FULLER J C, DJILALI N. GridLAB-D: an agent-based simulation framework for smart grids [J]. Journal of Applied Mathematics, 2014 (6): 1-12.
- [13] 朱城香, 杨俊华, 陈思哲, 等. GridLAB-D智能仿真软件及其应用 [J]. 水力发电, 2015, 41 (4): 74-78. ZHU Chengxiang, YANG Junhua, CHEN Sizhe, et al. GridLAB-D agent simulation software and its application [J]. Water Power, 2015, 41 (4): 74-78.
- [14] 叶铁丰, 王毅. 新型电力仿真软件GridLAB-D的研究应用 [J]. 科技资讯, 2014, 12 (10): 15-17.
- [15] 王岩, 孔林, 李艺丰, 等. 微电网需求响应策略的连续时间序列仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31 (10): 52-58. WANG Yan, KONG Lin, LI Yifeng, et al. Demand response strategy for microgrid based on continuous time series simulation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31 (10): 52-58.
- [16] MATIAŠOVSKÝ P. The equivalent thermal parameters, their analytical and experimental identification [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1992, 27 (2): 119-126.
- [17] BOKHARI A, ALKAN A, DOGAN R, et al. Experimental determination of the ZIP coefficients for modern residential, commercial, and industrial loads [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 29 (3): 1372-1381.
- [18] GAVANIDOU S, BAKIRTZIS A G. Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7 (1): 42-48.
- [19] 梁华彬. 基于GridLAB-D的经济需求响应模型研究与仿真 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [20] GridLAB-D Project Team. TMY2 weather data [EB/OL]. [2020-03-25]. https://sourceforge.net/projects/gridlab-d/files/climate/climate-US_2_0/.
- [21] AEMO. Aggregated price and demand data -historical [EB/OL].

- [2020-04-02]. <https://www.aemo.com.au/energy-systems/electricity/national-electricity-market-nem/data-nem/aggregated-data>.
- [22] 孟明, 陈世超, 赵树军, 等. 城市配电网居民住宅和商业负荷特性对比分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30 (4): 97-103. MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Contrastive analysis on residential load and commercial load of urban distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30 (4): 97-103.
- [23] 吴宏宇, 陈祖力, 李成, 等. 综合能源服务对居民小区负荷特性的影响研究 [J]. 能源与节能, 2019 (10): 42-45, 117.
- WU Hongyu, CHEN Zuli, LI Cheng, et al. Study on the impact of integrated energy services on load characteristics of residential quarters [J]. Energy and Energy Conservation, 2019 (10): 42-45, 117.
- [24] 陈景文, 莫瑞瑞, 党宏社, 等. 储能型光伏系统电池容量优化配置及经济性分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (28): 165-171. CHEN Jingwen, MO Ruirui, DANG Hongshe, et al. Battery capacity optimal configuration and economical analysis of energy storage photovoltaic system [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (28): 165-171.

收稿日期: 2020-05-05; 修回日期: 2020-05-20

作者简介:

漆淘懿 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为灵活负荷建模与控制、需求侧管理等。

惠红勋 (1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为灵活负荷建模与控制、电力市场等。

徐立中 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统

调度运行、电力市场等方面的工作。

马翔 (1972—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统调度运行、电力市场等方面的工作。

丁一 (1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、电力系统可靠性等。

Modeling and Control of Generalized Demand Response in Micro-grids Based on GridLAB-D

QI Taoyi¹, HUI Hongxun¹, XU Lizhong², MA Xiang², DING Yi¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: The distributed renewable energy sources such as photovoltaics in the power system are developing rapidly. The distributed rooftop photovoltaics have become a typical feature of smart micro-grid. In order to improve the stability and economy of the micro-grid with high penetration of photovoltaics, a generalized demand response is proposed in this paper by regulating flexible loads and energy storage equipment of residential customers, so as to increase the consumption of fluctuating photovoltaics and reduce the operating cost of smart micro-grids. Based on the continuous simulation software GridLAB-D, the model of residential micro-grids is developed, including the power generation model of photovoltaics, energy storage model, climate model, and electricity market model. Besides, control algorithms of the generalized demand response for flexible loads and energy storage devices are proposed. The proposed models and methods are verified by utilizing the IEEE 13-nodes test feeder model. The results illustrate that the generalized demand response in micro-grids can effectively reduce the curtailment of photovoltaics, save customers' electricity cost, and assist the main network to reduce the peak-valley difference of loads.

Key words: photovoltaic; micro-grid; demand response (DR); energy storage; GridLAB-D

(上接第 17 页 continued from page 17)

Modeling and Regulating Method of Air Conditioning Load in Wind Power Consumption Scenario

XUE Mingfeng¹, MAO Xiaobo¹, SHI Kun², PAN Yongtao¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi Power Supply Branch, Wuxi 214000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the increase of installed capacity of wind power in China, wind power consumption brings new challenges to the safe and stable operation of power grid. Air conditioning based thermal control load and power grid are interactive and friendly, and are more and more involved in the power system scheduling. In order to realize the compatibility between the variable frequency air conditioning load and the existing scheduling model, and make the air conditioning load smooth the wind power fluctuation, this paper proposes an air conditioning load modeling method and the corresponding regulation strategy based on the wind power consumption scenario. The variable frequency air conditioning is built into a thermal cell model, and the hierarchical distribution control method is used to achieve the effective control of the micro level thermal cell. The results show that the proposed thermal battery model can effectively describe the energy storage characteristics of the variable frequency air conditioning load, realize the compatibility of the variable frequency air conditioning load and the existing scheduling model of the system, and the proposed scheduling and control strategy can effectively regulate the variable frequency air conditioning load to improve the wind power consumption capacity of the system.

Key words: wind power consumption; demand response; air-conditioning load; microgrid system; thermal battery