

基于变频空调的虚拟储能建模与控制

张冲标¹, 高 博¹, 漆淘懿², 钱伟杰³, 冯 超⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司嘉善供电公司, 浙江 嘉善 314100; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 3. 国网浙江省电力有限公司嘉善供电公司, 浙江 嘉兴 314000; 4. 嘉兴恒创电力设计研究院有限公司嘉善分公司, 浙江 嘉善 314100)

摘 要:以分布式光伏为代表的可再生能源快速发展,为减少其波动性和不确定性给电力系统安全稳定运行带来的不利影响,亟需大量的灵活调节资源。锂电池由于能量密度高、配置灵活等优势在分布式光伏消纳方面得到了广泛的应用。然而,锂电池目前成本仍然较高,且存在一定的安全问题,短期内难以实现大规模的应用。因此,利用具有灵活功率调节能力、负荷占比较高的变频空调,提出面向分布式光伏消纳的虚拟储能建模方法和控制策略。首先,基于建立的房间等效热参数模型和变频空调运行模型,提出虚拟储能充放电模型的构建方法。随后,为实现虚拟储能的状态感知和可调容量评估,提出虚拟储能的状态描述指标体系。在此基础上,以分布式光伏消纳为目标,提出考虑充放电倍率约束的虚拟储能控制策略。最后,利用实际的光伏出力数据,对虚拟储能参与光伏波动平抑的过程进行仿真,并对比不同容量虚拟储能在分布式光伏消纳方面的效果差异。结果表明,利用变频空调构建的虚拟储能可以有效平抑光伏波动,促进可再生能源的友好并网。

关 键 词:虚拟储能;变频空调;分布式光伏;需求侧管理

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.026 中图分类号: TM933 文章编号: 1673-9140(2023)04-0240-10

Modelling and control of virtual energy storage based on the inverter air conditioner

ZHANG Chongbiao¹, GAO Bo¹, QI Taoyi², QIAN Weijie³, FENG Chao⁴

(1. Jiashan Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiashan 314100, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China; 4. Jiashan Branch, Jiaxing Hengchuang Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Jiashan 314100, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy represented by distributed photovoltaics (PV), massive flexible regulation resources are urgently needed to reduce the adverse effects of its volatility and uncertainty on the secure and stable operation of power systems. Due to the advantages of high energy density and flexible configuration, lithium batteries have been used in PV consumption. However, because of the expensive cost and unsafety of lithium batteries, it is difficult to implement them widely within a few years. A virtual energy storage (VES) modeling method and control strategy for distributed PV consumption are proposed by utilizing the inverter air conditioner with flexible power regulation ability. Firstly, based on the established equivalent thermal parameter model of the room and the operating model of the inverter air conditioner, a modeling method of the VES charging and discharging processes is proposed. Subsequently, in order to realize the status perception and regulation capacity evaluation of the VES, several evaluation indexes of VES are

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费青年科研创新专项(2021QNA4012)

通信作者: 漆淘懿(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事需求响应、强化学习等研究; E-mail: eeqty@zju.edu.cn

proposed. On this basis, aiming at distributed PV consumption, a VES control strategy considering charge and discharge rate constraints is proposed. Finally, using the actual PV output data, the process of VES participating in PV fluctuation stabilization is simulated, and the effect of VES with different capacities is compared. The results show that the VES constructed by the inverter air conditioner can effectively damping the photovoltaic fluctuation and promote the grid friendly integration of renewable energies.

Key words: virtual energy storage; inverter air conditioner; distributed photovoltaic; demand-side management

近年来,全球气候变暖问题日益严重,为实现“碳达峰,碳中和”(双碳)的目标,以分布式光伏为代表的可再生能源快速发展^[1]。中华人民共和国国家能源局的统计信息显示,2021年全国分布式光伏新增并网容量超过集中式光伏,达到2 927.9万kW^[2]。然而,光伏固有的波动性和间歇性使其出力具有不确定性,给电力系统的实时供需平衡带来了新的挑战^[3]。随着传统发电机组容量的进一步降低,亟需挖掘更多的灵活调节资源来平抑光伏出力的波动,从而保障电力系统的安全稳定运行^[4]。

储能打破了电力发输配用过程中供需同时性的限制,其灵活的充放电特性能够根据需求快速调节充放电功率,以储存多余的电能或者在供应紧张时期提供电能^[5]。为实现分布式光伏的友好并网和高效消纳,通常需要配置一定容量的储能设备以吸收光伏的出力波动^[6]。锂电池等电化学储能由于能量密度高、空间需求低,在楼宇、园区等场景中得到了较为广泛的应用^[7]。然而,现阶段锂电池的成本依然较高,短期内难以实现大规模的配置,并且锂电池的安全问题也不容忽视。为跟踪快速波动的光伏出力,锂电池需要频繁调节充放电功率,持续的调节可能引起电池发热甚至起火等严重的安全事故^[8]。

为寻找可替代储能的大容量、低成本灵活调节资源,部分学者将目光转向了具有丰富存量的需求侧灵活负荷资源。随着高级量测技术、智能通信技术的快速发展,需求侧负荷的快速精准调控成为可能^[9]。短期内通过对大量灵活负荷的功率控制,能够为电力系统提供显著的调节容量。以空调为代表的温控负荷在电力系统中占比较高,在炎热的夏季占比超过了40%,具备巨大的调节潜力^[10]。得益于房间的热惰性,对空调短时的功率调控不会导致

室内温度的显著变化,用户的舒适性也几乎不会受到影响^[11]。因此,负荷占比高、分布广泛、对用户影响小的空调负荷是电力系统可以挖掘的高价值柔性调节资源。文献[12]提出了一种基于直接负荷控制技术的大规模聚合空调控制方法,通过对空调的温度控制以提供小时级的负荷削减从而协助电力系统调峰;文献[13]基于建立的聚合空调模型,考虑用户的舒适度和响应意愿,评估了不同状态下大规模空调集群的响应潜力。

然而,现有研究大多针对只有运行和待机2种状态的定频空调,通过聚合控制的方式为电力系统提供持续的调峰、调频容量,具备灵活功率调节能力的变频空调暂未得到充分的重视。近年来变频空调的市场占比不断提高,2021年上半年其销量占比已经超过了80%^[14]。变频空调依靠变频器的频率调整能够实现连续的功率调节,单体空调即可具备灵活的功率调节能力,具有更广泛的应用场景。此外,在部分对变频空调的研究中,仍然集中于聚合变频空调参与系统的调峰、调频等辅助服务,没有充分利用其单体的灵活功率调节特性,例如文献[15]中将变频空调等效为传统发电机模型,根据本地测量的频率偏差为电力系统提供自动调频服务。

因此,为充分挖掘变频空调的调节潜力,将单体变频空调等效建模为虚拟储能,通过其功率的调节等效为储能的充放电过程,简化变频空调的外调节特性模型。单体变频空调构成的虚拟储能尽管容量较小,但是其拥有灵活的控制方式和广泛的空间分布,能够有效促进分布式光伏的就地消纳和友好并网^[16]。为实现虚拟储能的灵活控制,需要准确评估变频空调的实时状态和调节能力。现有研究提出的评价指标大多针对聚合空调,如调节能力、响应时间、持续时间和爬坡率等指标^[17],不再适用于面向分布式光伏消纳的虚拟储能。因此,针对单

体变频空调构成的虚拟储能,需要建立新的状态描述指标体系并提出相应的控制方法,实现虚拟储能的状态可感知、功率可调节。

为解决上述问题,本文提出基于变频空调的虚拟储能建模方法与控制策略。首先建立房间的等效热参数(equivalent thermal parameters, ETP)模型和变频空调的运行模型,定量分析变频空调控制过程中室内温度的动态变化。随后以传统储能为基础,提出包括等效容量、等效电量和等效最大充放电功率的虚拟储能状态描述指标体系及其计算方法,实现虚拟储能实时的状态感知。在此基础上,为保证运行过程中用户的舒适度,避免虚拟储能的过充和过放,提出考虑充放电倍率约束的虚拟储能控制策略,实现面向分布式光伏消纳的虚拟储能灵活控制。最后,基于分布式光伏的真实出力数据,对所提虚拟储能参与光伏平抑的过程进行仿真,并对比不同容量的虚拟储能在光伏消纳方面的效果差异,结果可以证明所提虚拟储能在促进光伏友好并网方面的有效性。

1 基于变频空调的虚拟储能建模

虚拟储能是指增加或降低灵活负荷短期内的功率,等效为传统储能的充电和放电过程。当变频空调稳定运行时,房间吸收和散失的热量保持平衡,因此室内温度维持不变。由于房间天然的热惰性,短时间内热量的改变不会导致温度的显著变化。因此,变频空调可以在用户预设的舒适温度区间内适当增加或减少其运行功率,从而吸收分布式光伏功率的波动。

基于变频空调的虚拟储能模型如图1所示,变频空调作为电能向热能转换的设备,利用内部的变频器改变压缩机工作的频率,从而调节空调的运行功率。以制冷模式为例,当虚拟储能充电时,变频空调功率增加,室内温度逐渐下降,等效为将电能转换为冷量储存在房间内部;当虚拟储能放电时,变频空调功率降低,室内温度逐渐上升,相当于将房间内储存的冷量转换为电能。

虚拟储能实时的可用容量和最大充放电功率与房间内的温度和变频空调的运行状态密切相关,

为实现虚拟储能的状态感知和精准控制,需要建立准确的房间热力学模型和变频空调运行模型。

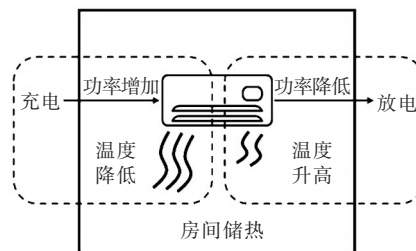


图1 基于变频空调的虚拟储能模型

Figure 1 The virtual energy storage (VES) model of the inverter air conditioner

1.1 房间等效热参数模型

室内温度的变化过程受多个因素的影响,为准确描述房间内温度变化与热量变化之间的关系,评估变频空调所构成的虚拟储能的实时可调容量,使用如图2所示的ETP模型来描述不同运行状态下房间的温度变化过程^[18]:

$$C_{\text{room}} \frac{dT_{\text{in}}}{dt} = Q_{\text{gain}} - Q_{\text{loss}} \quad (1)$$

式中, T_{in} 为房间内部的温度; C_{room} 为房间的等效热容,表征房间的储热能力,等效热容越大,温度变化越慢; Q_{gain} 为单位时间内房间吸收的热量; Q_{loss} 为单位时间内房间散失的热量。

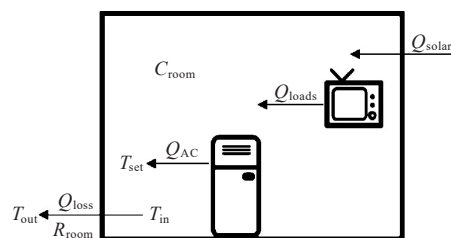


图2 ETP模型

Figure 2 The ETP model

单位时间内房间吸收的热量 Q_{gain} 和散失的热量 Q_{loss} 可以通过下式获得:

$$Q_{\text{gain}} = Q_{\text{AC}} + Q_{\text{loads}} + Q_{\text{solar}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{loss}} = \frac{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}{R_{\text{room}}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中, Q_{AC} 为单位时间内变频空调制热/制冷产生的热量, $Q_{\text{AC}} > 0$ 表示变频空调处于制热模式, $Q_{\text{AC}} < 0$ 表示变频空调处于制冷模式; Q_{loads} 为单位时间内房间其他电器工作产生的热量; Q_{solar} 为单位时间内房间吸收的太阳辐射热量; Q_{loss} 为单位时

间内房间内外热交换散失的热量; R_{room} 为房间的等效热阻,热阻越大,房间的保温性能越好; T_{in} 、 T_{out} 分别为室内、外温度。

对于物理参数确定的房间,其等效热容和等效热阻已经确定,忽略室内其他电器和太阳直射产生的热量,其温度变化过程主要与变频空调的制冷/制热功率、室外温度相关。空调的制冷量/制热量与电功率之间的关系可以表示为

$$Q_{AC} = P_{AC} \cdot \eta_{AC} \cdot M_{AC} \quad (4)$$

式中, P_{AC} 为空调的电功率; η_{AC} 为空调的能效比,能效比越大,单位电功率转换为制冷量或者制热量越大; M_{AC} 为空调的运行模式,1和-1分别表示制热和制冷模式。

1.2 变频空调运行模型

变频空调运行过程中可以通过调整变频器的频率,调节空调的功率以维持室内温度的稳定。正常运行时变频器的频率与实时的室内温度和设定温度之差相关^[19]:

$$f_{AC} = \begin{cases} f_{\max}, & T_{\text{in}} - T_{\text{set}} > \Delta T_{\max} \\ k(T_{\text{in}} - T_{\text{set}}) + b, & \Delta T_{\min} \leq T_{\text{in}} - T_{\text{set}} \leq \Delta T_{\max} \\ f_{\min}, & T_{\text{in}} - T_{\text{set}} < \Delta T_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中, f_{\max} 为变频空调的最高工作频率; ΔT_{\max} 为变频空调以最高频率运行时的最大温度偏差值,即当温差大于 ΔT_{\max} 时变频空调将以最高频率运行以能快速达到设定温度; k 为变频空调变频器的比例控制系数; b 为变频空调对应设定温度的基础工作频率; ΔT_{\min} 为变频空调按照最低工作频率运行时的最小温度偏差值; f_{\min} 为变频器的最低工作频率; T_{set} 为变频空调的设定温度。

变频空调的电功率和频率之间的线性关系^[20]可以近似表示为

$$P_{AC} = m \cdot f_{AC} + n \quad (6)$$

式中, m 、 n 分别为变频空调工作频率 f_{AC} 和运行功率 P_{AC} 之间关系的2个特征系数。

1.3 基于变频空调的虚拟储能模型

以变频空调工作在制冷模式为例,假设空调的设定温度为 T_{set} ,建立其虚拟储能模型。在虚拟储能的运行过程中,为保证用户的舒适度,室内温度需要保持在用户预先设置的舒适区间:

$$T_{\min} \leq T_{\text{in}}(t) \leq T_{\max} \quad (7)$$

式中, $T_{\text{in}}(t)$ 为室内的实时温度; T_{\min} 、 T_{\max} 分别为用户可接受的最低、最高温度。

如图3所示,变频空调稳定运行时其功率稳定在 P_{AC} ,同时室内温度维持在用户设定温度 T_{set} 。通过对变频空调功率的调控,室内温度可以在 T_{\min} 和 T_{\max} 之间变化,当室内温度分别达到下边界或者上边界时,对应的虚拟储能的电量分别为100%和0%。

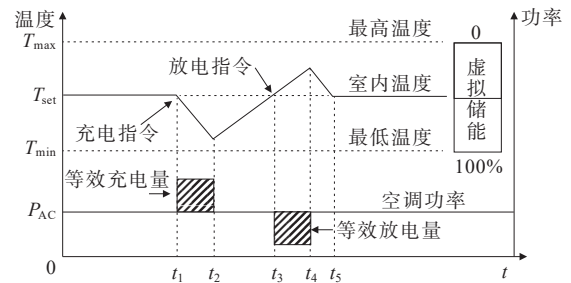


图3 虚拟储能充放电示意

Figure 3 The charge and discharge processes of the VES

t_1 时刻向虚拟储能发出充电指令,变频空调开始增加功率,室内温度逐渐降低,此阶段的等效充电量如图3中阴影部分的面积所示。 t_2 时刻结束充电,空调功率恢复到初始状态,室内温度随之逐渐升高。 t_3 时刻室内温度恢复到设定温度,然后向虚拟储能发出放电指令,变频空调降低功率,提供稳定持续的放电功率。 t_4 时刻放电过程结束,空调功率恢复到初始状态,室内温度开始下降。 t_5 时刻空调功率恢复初始值,室内温度也恢复至设定温度,空调再次进入稳定运行状态。

2 虚拟储能状态感知与充放电控制

为保证虚拟储能状态的准确描述,以便实时掌握其充放电能力,从而精准控制其充放电功率,基于实际储能的状态描述指标,本文建立虚拟储能的等效指标,并提出面向分布式光伏消纳的虚拟储能的控制策略。

2.1 电化学储能状态描述指标

电化学储能通常使用电池容量、荷电状态(state of charge, SOC)和最大充放电功率来表征其状态^[21],储能实时的SOC可以表示为

$$S_{\text{SOC}}(t) = S_{\text{SOC}}(t-1) - \eta_{\text{es}} \frac{P_{\text{es}}(t-1)}{C_{\text{es}}} \quad (8)$$

式中, $S_{\text{SOC}}(t)$ 、 $S_{\text{SOC}}(t-1)$ 分别为电池当前和上一时刻的荷电状态; η_{es} 为电池的充放电效率; $P_{\text{es}}(t-1)$ 为上一时刻电池的充放电功率, 大于零表示放电, 反之表示充电; C_{es} 为电池容量。

同时, 电池在运行过程中, 其荷电状态和充放电功率还要满足约束:

$$0 \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq 100\% \quad (9)$$

$$P_{\text{es, min}} \leq P_{\text{es}}(t) \leq P_{\text{es, max}} \quad (10)$$

式中, $P_{\text{es, min}}$ 、 $P_{\text{es, max}}$ 分别为电池的最大充电功率和最大放电功率。

2.2 虚拟储能状态描述指标

变频空调构成的虚拟储能和传统储能具有显著的差异, 虚拟储能的充放电过程若不加以适当限制, 可以提供极长的充放电时间。在达到最高室内温度 T_{max} 过程中, 3种典型调节模式的动态过程如图4所示, P_{AC}^T 、 P_{AC}^{T+2} 分别对应设定温度为 T 和 $T+2$ 时变频空调的稳定运行功率。

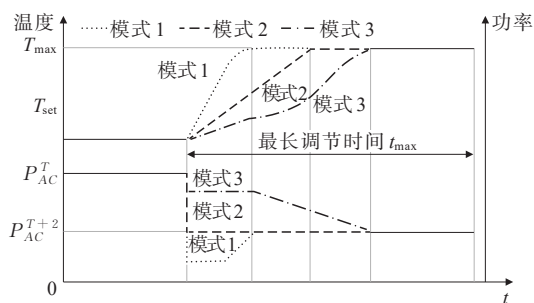


图4 虚拟储能调节特性

Figure 4 The regulation features of the VES

图4中模式1为大功率放电模式, 变频空调首先大幅降低功率以输出较大的放电功率, 室内温度快速上升, 在接近上边界时变频空调提高功率并最终稳定在 P_{AC}^{T+2} ; 模式2为恒定功率放电模式, 变频空调功率直接降低为 P_{AC}^{T+2} 从而提供稳定的放电功率; 模式3为低功率放电模式, 开始先提供较小的放电功率, 一段时间后空调继续降低功率至 P_{AC}^{T+2} 。

3种模式均能够在室内温度达到 $T+2$ 之后, 继续提供 $(P_{\text{AC}}^T - P_{\text{AC}}^{T+2})$ 的二段放电功率。即使利用统一的最长调节时间进行约束, 由于二段放电过程的持续时间不同, 仍然难以保证不同模式下最终的总放电量相等。此外, 长时间使室内温度维持在较

高或较低值, 会显著影响用户的舒适度, 可能挫伤用户用电的积极性。因此, 本文在建立虚拟储能的等效容量时, 忽略后期的二次充放电过程, 尽量保证用户的舒适度。基于实际储能的描述指标, 提出以下虚拟储能状态描述指标。

1) 等效容量。

虚拟储能是利用房间的储热能力进行能量储存, 变频空调是实现电能和热能转换的设备。虚拟储能热能的等效容量被定义为房间最大可增加热量和最大可减少热量之和, 因此, 其电能的等效容量 C_v 为热能的等效容量和变频空调能效比之比:

$$C_v = \frac{Q_v^u - Q_v^d}{\eta_{\text{AC}}} \quad (11)$$

式中, Q_v^u 为房间内最大可增加热量; Q_v^d 为房间内最大可减少热量。

对于一个参数确定的房间, 忽略前文提及的二次放电过程, 其房间内最大可增加热量和最大可减少热量可以根据用户预先设置的最佳设定温度和舒适温度区间获得:

$$Q_v^u = (T_{\text{max}} - T_{\text{set}}) C_{\text{room}} \quad (12)$$

$$Q_v^d = (T_{\text{set}} - T_{\text{min}}) C_{\text{room}} \quad (13)$$

式中, T_{set} 为最佳设定温度; T_{max} 为舒适温度区间的最高温度; T_{min} 为舒适温度区间的最低温度。

2) 等效荷电状态。

荷电状态表示虚拟储能实时储存的能量, 能够反映其当前的充放电能力, 虚拟储能的等效荷电状态可以表示为

$$S_{\text{SOC}}^v(t) = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{in}}(t)}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \times 100\% \quad (14)$$

3) 最大充放电功率。

虚拟储能在充放电过程中, 其提供的充放电功率受到变频空调运行状态的约束, 根据空调的参数, 虚拟储能的充放电功率 $P_v(t)$ 需要满足:

$$P_{\text{AC}}^{\text{stb}} - P_{\text{AC}}(t) \leq P_v(t) \leq P_{\text{AC}}^{\text{rated}} - P_{\text{AC}}(t) \quad (15)$$

式中, $P_{\text{AC}}^{\text{stb}}$ 、 $P_{\text{AC}}^{\text{rated}}$ 分别为空调处于待机状态和满负荷状态的运行功率; $P_{\text{AC}}(t)$ 为空调实时的运行功率。

2.3 面向光伏消纳的虚拟储能控制策略

面向分布式光伏消纳的虚拟储能架构如图5所示, 光伏经逆变器后和空调一起接入交流电网中, 并通过电表与配电网相连。虚拟储能的核心控制器实时采集光伏的出力、室内温度、变频空调的运

行功率以及变频空调的设定温度等信息,并利用本文所提出的虚拟储能控制策略调控变频空调以平抑光伏波动。

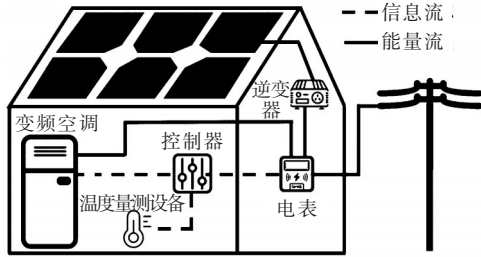


图 5 光伏—虚拟储能架构

Figure 5 The scheme of photovoltaic and virtual energy storage

由于分布式光伏装机容量通常大于变频空调额定功率,利用虚拟储能完全就地消纳光伏是不现实的^[22]。因此,虚拟储能的调控目标为平抑分布式光伏的波动,即补偿光伏预测出力和实际出力之间的偏差。通过这种方式,能够消除光伏出力的不确定性,使得光伏成为具有确定出力的分布式电源,便于电力系统进行调度。

分布式光伏实时出力偏差可以表示为

$$\Delta P_{PV}(t) = P_{PV}^f(t) - P_{PV}^r(t) \quad (16)$$

式中, $\Delta P_{PV}(t)$ 为光伏的实时出力偏差, $P_v(t) = \Delta P_{PV}(t)$, $P_v(t)$ 为虚拟储能的充放电功率,若 $\Delta P_{PV}(t) > 0$, 表示实际出力偏低,需要虚拟储能放电;反之表示实际出力偏高,需要虚拟储能充电以消纳多余的功率; $P_{PV}^f(t)$ 、 $P_{PV}^r(t)$ 分别为光伏的预测和实际出力。

为避免虚拟储能出现过充和过放,同时尽可能让电量维持在 50% 附近以保证用户的最大舒适度,虚拟储能在不同荷电状态下需要设置不同的最大充放电功率限制。因此,提出基于充放电倍率约束的虚拟储能控制策略,如图 6 所示。

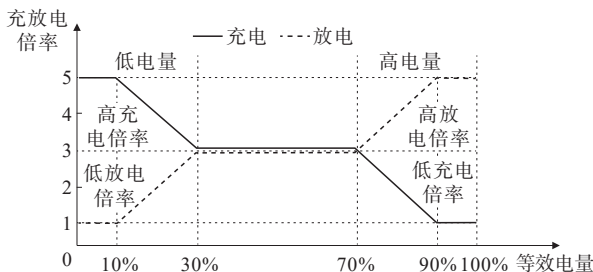


图 6 虚拟储能充放电倍率曲线

Figure 6 The charge and discharge rates of the VES

图 6 中实线和虚线分别代表充电和放电倍率约束与虚拟储能等效电量之间的变化关系。以充电过程为例:当虚拟储能电量低于 10% 时,虚拟储能需要快速充电,因此最大充电倍率设置为 5;当虚拟储能电量为 10%~30% 时,最大充电倍率随着电量的增加逐渐降低;当电量处于 30%~70% 时,最大充电倍率恒定为 3;随着电量的进一步增加,虚拟储能需要限制充电功率避免出现过充,因此最大充电倍率需要降低;当电量超过 90% 之后,虚拟储能的充电倍率被限制为 1,以应对极端条件下的长时间充电需求,并且不会使室内温度超过用户的舒适温度区间。

具体的充电倍率系数 $k_c(t)$ 、放电倍率系数 $k_d(t)$ 以及虚拟储能等效电量之间的关系为

$$k_c(t) = \begin{cases} 5, & S_{\text{soc}}^v(t) < 10\% \\ 6 - 10 \times S_{\text{soc}}^v(t), & 10\% \leq S_{\text{soc}}^v(t) < 30\% \\ 3, & 30\% \leq S_{\text{soc}}^v(t) < 70\% \\ 10 - 10 \times S_{\text{soc}}^v(t), & 70\% \leq S_{\text{soc}}^v(t) < 90\% \\ 1, & S_{\text{soc}}^v(t) \geq 90\% \end{cases} \quad (17)$$

$$k_d(t) = 6 - k_c(t) \quad (18)$$

利用所提的虚拟储能充放电倍率曲线,结合虚拟储能的基准功率,能够限制不同荷电状态下的虚拟储能的充放电功率,从而有效避免虚拟储能的过充及过放情况。基准功率 P_{AC}^{ref} 指的是虚拟储能可以保持的长时间充电或者放电功率,即变频空调在设定温度和最高温度稳定运行的功率之差表示为

$$P_{AC}^{\text{ref}} = P_{AC}^{T_{\text{set}}} - P_{AC}^{T_{\text{max}}} \quad (19)$$

式中, $P_{AC}^{T_{\text{set}}}$ 、 $P_{AC}^{T_{\text{max}}}$ 分别为变频空调以 T_{set} 、 T_{max} 设定温度运行时的稳定功率。

因此,虚拟储能的充放电功率除了要满足式 (15) 中变频空调机电特性决定的物理约束外,还需要满足以下充放电倍率约束:

$$-k_c(t) \cdot P_{AC}^{\text{ref}} \leq P_v(t) \leq k_d(t) \cdot P_{AC}^{\text{ref}} \quad (20)$$

关于最大充电倍率选择的主要依据如下:由式 (1)~(3) 可知,空调功率与设定温度和室外温度之差近似成正比,如图 7 所示。

在正常运行时,空调可上调或下调的温度均为 ΔT ,对应的功率变化值为参考功率 P_{AC}^{ref} 。现有研究大多将室内温度的变化区间设置为空调设定温度

的 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,即 $\Delta T=2$,以保证用户的舒适性^[23]。若室内设定温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$,当虚拟储能电量极低或极高需要以最大倍率进行充电或者放电时,以5作为最大充电倍率可以等效为将空调设定温度调整为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时空调的功率变化量,即让空调以最大或者最小功率运行从而提供最大的充放电功率。在大部分场景下,已经能够覆盖空调的实际运行域,实现其调节潜力的最大化利用,因此本文将最大充放电倍率设置为5。

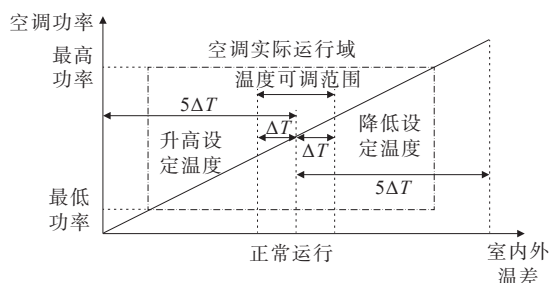


图7 虚拟储能调节可行域

Figure 7 The feasible domain of VES regulation

此外,在虚拟储能充放电过程中,为保证用户的舒适度,避免单次充/放电过程持续较长时间,单次虚拟储能的调控时间 t_{DR} 需要满足:

$$0 \leq t_{\text{DR}} \leq t_{\text{max}} \quad (21)$$

其中, t_{max} 为最长可调控时间,当调控时间 t_{DR} 达到最长可调控时间 t_{max} 后,需要将室内温度恢复到设定温度 T_{set} ,从而保证用户的舒适度。

3 算例分析

为验证所提变频空调虚拟储能在促进分布式光伏消纳方面的有效作用,本文基于真实的光伏出力数据,对分布式光伏—虚拟储能系统进行仿真分析,并对比不同虚拟储能容量在光伏波动平抑效果方面的差异。

3.1 算例设置

分布式光伏的出力数据来自浙江省某楼宇装机容量为 5 kW 的屋顶光伏。选择2021年夏季某日07:00—15:00共8 h的数据,光伏实际功率、预测功率如图8所示,该日天气晴朗,气温较高,不同时段的外室温度如柱状所示。

变频空调、房间等效热参数如表1所示。假设

变频空调的频率能够在允许范围内灵活调节,忽略空调能效比的变化。空调的最低运行功率(待机功率)设置为 100 W ,最高运行功率不超过额定功率 $2\text{ }000\text{ W}$ 。

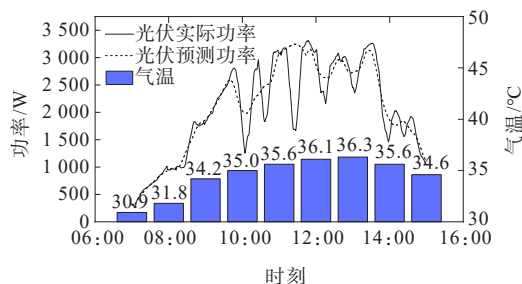


图8 光伏实际功率、预测功率和气温数据

Figure 8 The real PV power, the forecast PV power and the ambient temperatures

表1 空调及房间参数

Table 1 Parameters of the inverter air conditioner and the room

空调额定功率/W	能效比	房间等效热容/(kJ/ $^{\circ}\text{C}$)	房间等效热阻/($^{\circ}\text{C}/\text{kW}$)
2 000	3.1	1 000	0.002

用户的设定温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大可接受温度变化为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,即室内温度需要保证为 $23\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。基于本文提出的虚拟储能指标体系,当空调以 $1\text{ }000\text{ W}$ 功率稳定运行、室内温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,利用式(11)~(20)可计算得到虚拟储能的参数,如表2所示。其中虚拟储能的等效容量为 $0.358\text{ kW}\cdot\text{h}$,当前状态下荷电状态为 50% ,最大充、放电功率分别为 $1\text{ }000$ 、 900 W 。由于空调待机时的最低运行功率设置为 100 W ,因此虚拟储能的最高放电功率为 900 W 。在运行过程中,除了储能容量保持不变,其余3个参数会跟随空调运行状态的变化而变化。

表2 虚拟储能参数

Table 2 Parameters of the VES

储能容量/($\text{kW}\cdot\text{h}$)	荷电状态/%	最大充电功率/W	最大放电功率/W
0.358	50	1 000	900

3.2 仿真结果

算例仿真结果如图9所示。图9(a)展示了该分布式光伏的出力波动情况,大于零表示实际出力低于预测出力,需要由虚拟储能补偿这部分功率缺

额;反之表示实际出力高于预测出力,需要虚拟储能充电以吸收额外的功率。从图 9(a)中可以看出,分布式光伏的出力极易受云层等因素的影响,波动较为频繁,部分时段的波动幅值也较大,在 11:30 附近最大功率偏差达到了 1 500 W 左右。若不采取有效措施,大量分布式光伏的出力波动会对电力系统的安全稳定运行造成严重影响。

图 9(b)展示了变频空调在光伏平抑过程中的功率变化,虚线表示未参与光伏波动平抑的空调功率,可以看出随着室外气温的上升,空调的功率也随之升高以维持室内温度的稳定;实线表示变频空调的功率变化情况,得益于变频空调的灵活调节特性,虚拟储能可以跟踪快速波动的分布式光伏调节充放电功率。在功率偏差较小时,虚拟储能可以有效平抑光伏功率的波动。

如图 9(c)、(d)所示,当出现较大的功率偏差时,例如 11:30 附近偏差达到了 1 500 W,由于虚拟储能的最大放电功率的限制,虚拟储能只能提供 800 W 的放电功率,不能完全消除光伏出力偏差。同时在这一过程中,虚拟储能的大功率放电导致室内温度快速上升,虚拟储能荷电状态快速下降。为避免虚拟储能出现过放情况,利用所提考虑荷电状态的虚拟储能控制策略,其放电功率随着荷电状态的降低不断下降,以避免室内温度超过最高温度从而影响用户的舒适度。最终房间的最高温度和虚拟储能的最低荷电状态分别被限制在 26.6 °C 和 10% 附近。

在 8 h 的虚拟储能充放电过程中,除了光伏出力波动较大的少数时刻,室内温度最高达到了 26.6 °C,其余时刻室内温度的变化范围基本小于 ± 0.5 °C。相较于普通定频空调正常运行过程中 ± 1 °C 温度变化范围,变频空调所构成的虚拟储能在参与分布式光伏偏差平抑过程中,用户的舒适度几乎未被影响,可见虚拟储能在助力分布式光伏消纳方面的优越性。

考虑到不同用户的温度需求不同,其虚拟储能也具有不同的容量和最大充放电功率,为进一步分析不同的用户舒适温度区间对虚拟储能光伏消纳效果的影响,设置高、中等和低舒适度 3 种场景,分别对应的用户最大可接受温度变化为 1、2 和 3 °C。

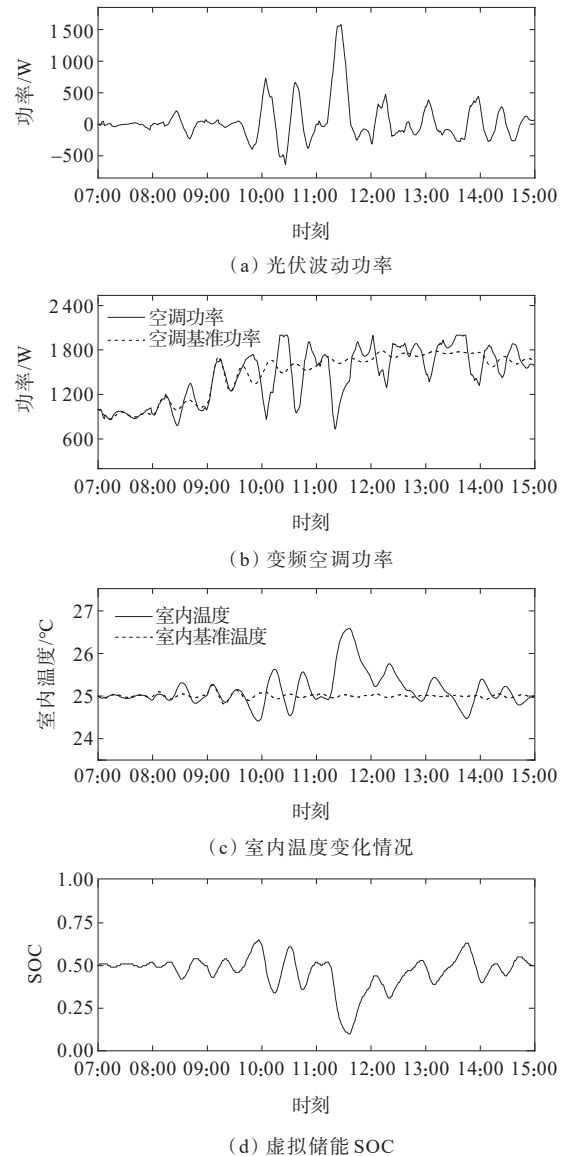


图 9 算例仿真结果

Figure 9 The simulation results

3 种用户舒适度下虚拟储能参与分布式光伏波动平抑的仿真结果如图 10 和表 3 所示。从图 10 中可以看出,3 种场景下虚拟储能均能有效追踪光伏的出力变化。然而,当有较大的充放电功率需求时,低舒适度对应的虚拟储能可以提供更多的充放电容量和更大的充放电功率,例如:在 11:30 的光伏骤降时期,低舒适度的虚拟储能比中等舒适度多提供了约 400 W 的放电功率。在整个消纳过程中,低、中等和高舒适度的最大功率偏差分别为 656、1 051 和 1 328 W,可见更大的温度调节范围能够有效降低调节过程中的偏差。此外,高舒适度会导致虚拟储能的容量和最大充放电功率被严重限制,除了 11:30 附近的大波动平抑率较低外,10:00—

11:00时3次功率较小的波动都不能完全平抑。因此,高舒适度下的光伏波动平抑率仅有48.64%,显著低于低、中等舒适度的58.91%和54.26%。

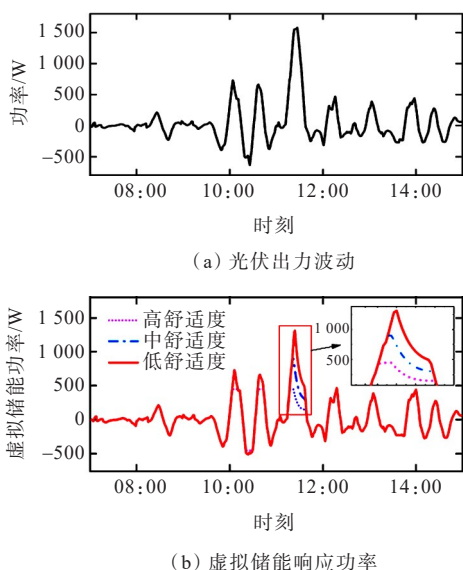


图10 不同用户舒适度的虚拟储能响应情况

Figure 10 The response effects of the VESs with different user's comforts

表3 不同舒适度下光伏平抑效果对比

Table 3 The comparisons of eliminations of photovoltaic fluctuations under different user's comforts

舒适度	温度可调	光伏波动	最大功率
	区间/℃	平抑率/%	偏差/W
低	[22,28]	58.91	656
中	[23,27]	54.26	1 051
高	[24,26]	48.64	1 328

在实际应用过程中,用户可以根据实际情况,例如空调额定功率、分布式光伏装机容量以及温度敏感程度,确定合适的最大温度变化区间。综合来看,±2℃是一个较好的温度区间,能够在保证良好的舒适度的同时实现较好的光伏消纳效果。

4 结语

为促进分布式光伏等可再生能源的消纳,在现有储能成本较高的背景下,利用具备灵活功率调节能力的变频空调,建立了面向光伏出力波动的虚拟储能模型。通过建立房间的等效热参数模型和变频空调运行模型,提出了基于变频空调的虚拟储能建模方法。在此基础上,提出了虚拟储能的状态描述指标体系和考虑充放电倍率约束的虚拟储能控

制策略,实现了变频空调这一典型需求侧资源的准确状态感知和灵活功率调节。最后,通过仿真证明了所提虚拟储能可以在几乎不影响用户舒适度的前提下,平抑分布式光伏出力的随机波动,减少其不确定对电力系统安全稳定运行的影响。通过利用广泛分布的变频空调,能够有效促进分布式光伏的友好并网,助力“双碳”目标的实现。

参考文献:

- [1] 柳璐,程浩忠,吴耀武,等.面向高比例可再生能源的输电规划方法研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(13):176-183.
LIU Lu, CHENG Haozhong, WU Yaowu, et al. Research progress and prospects of transmission expansion planning method for high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 176-183.
- [2] 国家能源局.2021年光伏发电建设运行情况[EB/OL].
http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm, 2022-03-09.
National Energy Administration. Construction and operation of photovoltaic power generation in 2021[EB/OL].
http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm,2022-03-09.
- [3] 刘晓艳,王珏,姚铁锤,等.基于卫星遥感的超短期分布式光伏功率预测[J].电工技术学报,2022,37(7):1800-1809.
LIU Xiaoyan, WANG Jue, YAO Tiechui, et al. Ultra short-term distributed photovoltaic power prediction based on satellite remote sensing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1800-1809.
- [4] TROVATO V, SANZ I M, CHAUDHURI B, et al. Advanced control of thermostatic loads for rapid frequency response in Great Britain[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2106-2117.
- [5] 李景丽,时永凯,张琳娟,等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):94-102.
LI Jingli, SHI Yongkai, ZHANG Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [6] 周杨,杜炜凝,朱文韬,等.电网侧电池储能电站运行分析系统的建设与应用[J].供用电,2021,38(6):74-80.
ZHOU Yang, DU Weining, ZHU Wentao, et al. Construction and application of operation analysis system for power grid side battery energy storage power station[J].

- Distribution & Utilization, 2021, 38(6):74-80.
- [7] 李争,张蕊,秦岩,等.基于自适应反演滑模的电池储能系统的能量管理[J].电测与仪表,2022,59(10):67-74.
LI Zheng,ZHANG Rui,QIN Yan,et al.Energy management of battery energy storage system based on adaptive inversion sliding mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(10):67-74.
- [8] 蔡伟,张鑫,张科杰,等.用户侧储能安全技术分析[J].供用电,2021,38(8):1-11+31.
CAI Wei,ZHANG Xin,ZHANG Kejie, et al.Energy storage safety technology analysis on user side[J].Distribution & Utilization,2021,38(8):1-11+31.
- [9] 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.
- [10] ZHANG C,XUE X,ZHAO Y,et al.An improved association rule mining-based method for revealing operational problems of building heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems[J]. Applied Energy, 2019; 253:113492.
- [11] 和学豪,顾煜炯,赵梓良,等.计及建筑蓄能的综合能源系统优化调度[J].电测与仪表,2021,58(10):1-8.
HE Xuehao, GU Yujiong, ZHAO Ziliang, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering building energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(10):1-8.
- [12] LU N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions Smart Grid 2012,3(3):1263-1270.
- [13] 杨秀,傅广努,刘方,等.考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J].电网技术,2022,46(2):699-714.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Study on potential evaluation and control strategy of air conditioning aggregation response considering multiple factors[J].Power System Technology,2022,46(2):699-714.
- [14] 智研咨询.2021上半年中国空调市场发展现状分析:呈现量降额涨走势[EB/OL].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1708496969046436932&wfr=spider&for=pc>,2021-08-19.
Zhiyan Consulting. Analysis of the development status of China's air conditioning market in the first half of 2021: showing a trend of volume reduction and increase[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1708496969046436932&wfr=spider&for=pc>,2021-08-19.
- [15] HUI H, DING Y, CHEN T, et al. Dynamic and stability analysis of the power system with the control loop of inverter air conditioners[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(3):2725-2736.
- [16] 许鹏,孙毅,谢祥颖,等.异构温控负荷群模型优化及联合调控策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):120-128.
XU Peng,SUN Yi,XIE Xiangyin,et al.Model optimization and joint control strategy for heterogeneous thermostatically controlled loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(5):120-128.
- [17] HUI H,DING Y,LIU W,et al.Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners[J]. Applied Energy, 2017, 196:218-228.
- [18] MATIAŠOVSKÝ P. The equivalent thermal parameters, their analytical and experimental identification[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,1992,27(2):119-126.
- [19] 丁小叶.变频空调参与需求响应的调控策略与效果评估[D].南京:东南大学,2016.
DING Xiaoye.Regulating strategy and effect evaluation of inverter air conditioner applied in demand response[D]. Nanjing:Southeast University,2016.
- [20] HUI H, DING Y, ZHENG M. Equivalent modeling of inverter air conditioners for providing frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,66(2):1413-1423.
- [21] 王凯丰,谢丽蓉,乔颖,等.电池储能提高电力系统调频性能分析[J].电力系统自动化,2022,46(1):174-181.
WANG Kaifeng,XIE Lirong,QIAO Ying,et al. Analysis of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(1):174-181.
- [22] 张新民,郭铭海,林亚培,等.考虑灵活性的含分布式光伏配电网双层优化调度方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):56-66.
ZHANG Xinmin,GUO Minghai,LIN Yapei,et al.A bi-layer optimal dispatch approach for distribution networks with distributed photovoltaic considering the flexibility[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):56-66.
- [23] 陈璐,杨永标,徐青山.基于时变互补特性的聚合空调调控及恢复策略[J].电力系统自动化,2020,44(13):39-47.
CHEN Lu, YANG Yongbiao, XU Qingshan. Coordinated control and recovery strategy for aggregated air-conditioner based on time-variant complementary characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(13):39-47.