

# 综合能源系统下虚拟储能建模方法与应用场景 研究综述及展望

苏娟, 李拓, 刘峻玮, 夏越, 杜松怀

(中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了促进多能耦合互补和实现可再生能源就地消纳, 综合能源系统已成为多领域的研究热点。考虑到能源设备及网络的多样性、复杂性以及多种能源时间尺度的差异性, 根据能量平衡原理, 对系统内具有可调特性的源、网、荷进行储能化建模, 并构成虚拟储能系统参与到综合能源系统的优化调度中。为了准确把握虚拟储能的研究重点, 首先介绍了虚拟储能的定义、逻辑架构和技术内涵; 其次针对综合能源系统源、网、荷端设备或网络, 总结和归纳了 4 种虚拟储能建模方法和特性指标; 然后重点分析了虚拟储能在 4 种典型场景的具体应用; 最后展望了虚拟储能未来的发展方向。

**关键词:** 综合能源系统; 虚拟储能; 建模方法; 应用场景

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202311066

## 0 引言

为实现“双碳”目标, 中国可再生能源发电量占比逐年提升<sup>[1]</sup>。根据国家能源局的统计数据<sup>[2]</sup>, 2022 年全国风电和光伏发电新增装机突破 1.2 亿 kW, 达到 1.25 亿 kW。可再生能源已成为中国电力新增装机的主体, 全国新增装机占比达到 76.2%。然而, 随着越来越多的分布式可再生能源接入到电力系统中, 其不可控性和不确定性给电力系统的安全、经济和灵活运行带来了风险和挑战<sup>[3]</sup>。

综合能源系统 (integrated energy system, IES) 是一种集电、热、冷、气、水于一体的多种能源互补融合和协同互联的并以电力为核心地位的新型能源系统, 可以提高能源利用率和可再生能源就地消纳能力<sup>[4]</sup>。其中储能技术 (energy storage, ES) 可以与分布式能源出力相匹配, 在 IES 中消除能源生产、输运和使用过程中的不确定性方面发挥重要作用, 但由于其投资建设成本较高, ES 的发展受到了一定程度的限制<sup>[5]</sup>。另一方面 IES

具有不同形式的能源形态, 电、热、冷、气、水等能源运行特性存在差异, 无法通过同一时间尺度进行优化调度, 且多能源耦合使系统复杂性增加, 使 IES 优化调度成为一个大规模复杂的非线性问题, 求解困难, 不利于系统状态快速调整。

虚拟储能 (virtual energy storage, VES) 是一种聚合 IES 源、网、荷端可调度灵活性电源、能源网和负荷, 以存储系统剩余能量或向系统注入短缺能量, 从而发挥与实体 ES 相同调节作用的平衡多种能源的思想<sup>[6]</sup>。现有的研究已对 VES 展开分析并将其应用于 IES 的优化调度中。文献<sup>[7]</sup>建立了电力需求响应和热惯性 VES 模型, 并联合实际电储能和热储能共同参与到 IES 的经济调度中。文献<sup>[8]</sup>协调和聚合恒温可控负载和电动汽车形成 VES 系统, 增加或减少传统发电机产生的功率控制动作可以等效地通过总负荷需求的减少或增加来提供。文献<sup>[9]</sup>对恒温控制负载的 VES 建模和控制策略进行了概括和总结。上述文献主要对单一种类负荷的 VES 展开研究与应用, 缺少对 IES 内整体虚拟储能的宏观介绍和归纳, 因此本文主要对 IES 内虚拟储能主要建模方法和应用场景进行综述。首先详细介绍虚拟储能系统在 IES 中的基本特征; 然后按照 VES 调控方式的不同, 归纳 IES 内虚拟储能建模方法; 其次重点分

**收稿日期:** 2023-11-15; **修回日期:** 2024-03-29。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (基于移频理论的电/热/气多能源系统多时间尺度暂态建模和多速率仿真方法研究, 52007194)。

析了虚拟储能在 4 种典型场景的具体应用；最后结合虚拟储能研究现状和所面临的技术难题，提出 VES 技术进一步的研究方向。

## 1 虚拟储能基本特征

### 1.1 虚拟储能逻辑架构

图 1 为典型 IES 虚拟储能系统的结构。IES 以电力系统为核心，并与热网、气网、冷网和水网协同配合，充分利用分布式能源设备：风电和光伏、能源转换设备：热电联产装置、燃气轮机、电制冷和电锅炉等，以及多能源存储装置：蓄电池、储热罐和储气设备等，向综合用能集群进行供电。

IES 能源特性具有多样性，但在实际应用中，更侧重分析 IES 响应电网调控的潜力。因此，考虑到能源设备及网络的多样性、复杂性以及多种能源时间尺度的差异性，从平衡能量和能源形态归一化的角度出发，可对具有同一可调特性的源、网、荷进行储能化建模，从而构成虚拟储能系统并参与到 IES 的优化调度中，并根据设

备或网络特性以及调控需求，灵活选择储能等效原则<sup>[10]</sup>。柔性电负荷（电动汽车和洗衣机等）可根据用户的用能意愿调节充放电方式；温控负荷（空调、热泵和冰箱等）<sup>[11]</sup>可根据外界温度的要求调节自身出力；旋转电机（风机和异步电动机等）<sup>[12]</sup>通过调整自身转速从而调节自身功率的变化；通过合理利用惰性网络（热网、气网、冷网和水网）<sup>[13]</sup>自身具备的蓄能特性，调节储能介质温度，从而控制其储能量。

### 1.2 虚拟储能技术内涵

类比实际储能装置的工作特性，可对 VES 的充放能功率、虚拟储能容量、充放能时间以及虚拟荷能状态等储能指标进行定义。VES 的充放能功率代表了能源设备或网络参与 IES 优化调度时等效功率的大小，对于设备级 VES 来说，其值取决于设备的开关状态。虚拟储能容量反映了 VES 的性能和规格。VES 的充放能时间决定了 VES 的可持续响应能力。虚拟荷能状态（state of virtual energy, SOVE）可视为 VES 剩余能量的指标状态，直接代表设备或系统的响应能力<sup>[14]</sup>。本文根据设备或系统的资源特性，在 VES 建模中对上述

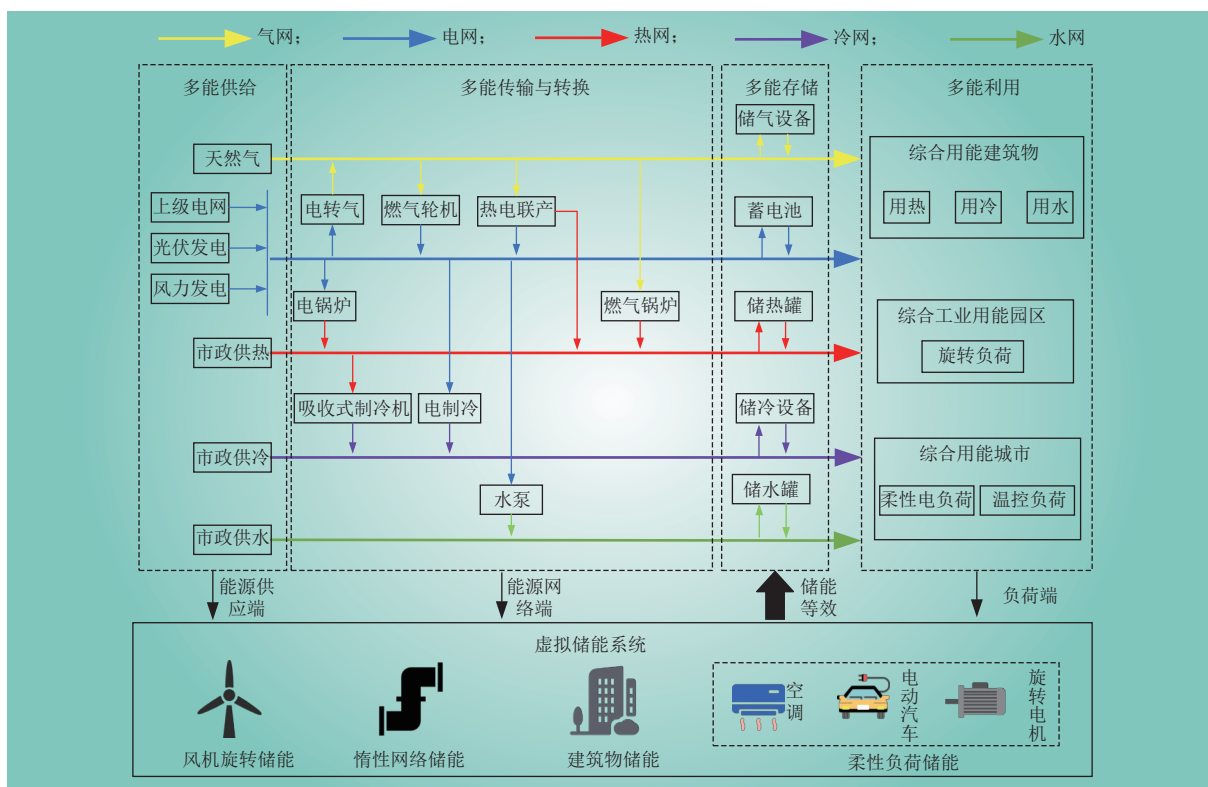


图 1 IES 虚拟储能系统的结构

Fig. 1 Structure diagram of IES virtual energy storage system



虚拟储能相关指标的概念进行映射。

通过在 IES 内引入 VES，为 IES 的优化调度提供了新思路。其作用包括：1) 结合对灵活性资源的控制以及与能源价格的实时互动，将能源设备或网络出力的增加或减少等效成 VES 的放能或充能，将灵活性负荷复杂的微观动态模型等效成线性的宏观蓄放能模型，一定程度上减小了系统优化运行的规模，提高了求解效率；2) VES 作为一种以能源设备出力或能源网络容量变化为基础的缓冲能源的新方式，在保持系统稳定运行的同时，通过挖掘多能互补的协同灵活性，从而提高电力系统的经济性和环保性，提升 IES 可再生能源消纳能力。一定程度上可大幅减少传统 ES 的建设投资，满足分布式能源发展对于储能的迫切需求，相较于传统 ES 具有良好的经济性；3) 对 IES 的电、热、冷、气、水等各种异构的能源要素进行数字化抽象和虚拟化，从而把物理上和化学上特性各异的能源进行归一化整合，从而打破能源在时空上的差异性壁垒，凸显能源可视、可管控特性，实现 IES 能源的时空可变、粒度可控的动态优化调度。柔性负荷的微观动态模型和虚拟储能模型对比如表 1 所示。

表 1 柔性负荷微观动态模型和虚拟储能模型对比  
Table 1 Comparison between flexible load micro-dynamic model and virtual energy storage model

负荷模型	模型精度	求解效率	模型适用性
微观动态模型	充分考虑了负荷受到各种因素影响时响应情况，精度较高	包含大量的变量和复杂的非线性方程，求解效率较低	适用于具有明显时变特性、快速响应以及包含复杂内部结构和交互关系的单一负荷分析；系统规模较小，所涉及及负荷特性变化在同一时间尺度上
虚拟储能模型	通过等效参数替代的方法简化复杂的动态过程，但精度较低	仅需考虑能量的输入输出和储存等关键变量，动态方程线性化，求解效率较高	适用于需要实现能量平衡或灵活调度的场景；系统规模较大，所涉及的负荷特性变化具有较大的差异，无法在同一时间尺度上分析

## 2 虚拟储能建模方法研究

本节主要针对 IES 内具有虚拟储能特性的源、网、荷设备或网络的 VES 建模方法进行归纳。根据设备调控原理，本节主要分析基于室内温度可调的温控负荷、基于充放电时段可调的电

动汽车、基于转速可调的旋转电机和基于供回水温度可调的供热管网 4 种 VES 建模方法，并总结不同调控原理和方法下的虚拟储能特性指标。

### 2.1 基于室内温度可调的温控负荷虚拟储能建模方法

温控负荷作为居民用电负荷中占有较大比例的一部分，具有良好的可调控特性，如空调、冰箱，热泵和热水器等。其中空调负荷在夏季峰值负载期间占比较大，具有很大的调节潜力，且大部分文献都围绕空调负荷虚拟储能特性进行研究<sup>[15]</sup>。因此本节主要以空调负荷作为主要研究对象。

#### 2.1.1 空调-建筑物虚拟储能模型

空调-建筑物的虚拟储能模型主要以人体热舒适度为调控区间，将建筑物热量平衡关系作为基础，利用建筑物热惰性的特点，通过调整空调设定温度值实现 VES 的充放电过程<sup>[16-19]</sup>。

##### 1) 空调负荷虚拟储能实现原理。

人体热舒适度的可承受范围是空调负荷可调节能力的前提，室内温度可以在人体可承受温度下限  $T_{min}$  和可承受温度上限  $T_{max}$  波动。本节所提出的控制模式为通过调整温度设定值  $T_{set}$  来改变空调负荷大小，其控制原理如图 2 所示。

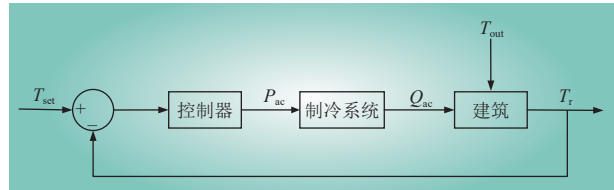


图 2 空调负荷温度控制原理  
Fig. 2 Air conditioning load temperature control schematic diagram

空调-建筑温控系统中，调节  $T_{set}$  可以改变室内温度  $T_r$ 。在系统稳态下，空调电功率  $P_{ac}$ 、空调制冷量  $Q_{ac}$  和  $T_r$  保持稳定。温度设定值改变时会破坏温度平衡，系统进入暂态， $P_{ac}$  和  $Q_{ac}$  会立刻变化，但  $T_r$  变化会滞后，直到系统再次恢复稳态。

处于稳态时，空调制冷量与建筑物散热量处于相对平衡，则空调制冷电功率为

$$P_{ac-o}(t) = \frac{Q_s(t)}{\eta} = \frac{T_{out}(t) - T_r(t)}{\eta R} \quad (1)$$

式中： $P_{ac-o}(t)$  为空调负荷  $t$  时刻处于稳态时的电功率； $Q_s(t)$  为建筑物  $t$  时刻的散热功率； $\eta$  为空调热电转换系数； $T_r(t)$ 、 $T_{out}(t)$  分别为  $t$  时刻室内外

温度； $R$  为建筑物等效热阻。

暂态时，空调电功率的计算公式为

$$P_{ac-s}(t) = \begin{cases} 0, & T_{set}(t) > T_r(t) \\ P_{rated}(t), & T_{set}(t) < T_r(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{ac-s}(t)$  为空调负荷  $t$  时刻处于暂态时的电功率； $P_{rated}(t)$  为空调负荷  $t$  时刻的额定功率； $T_{set}(t)$  为  $t$  时刻温度设定值。

通过上述公式可得出，当  $T_{set}$  升高时，空调停止制冷，功率减小至 0，相当于 ES 放电；而当  $T_{set}$  降低时，空调功率满出力，并增大至额定功率，相当于 ES 充电<sup>[18-19]</sup>。

### 2) 空调负荷虚拟储能特性指标。

将建筑物等效为热容和热阻，当初始设定温度为  $T_{set0}$  时，若将其调整为新的设定温度  $T_{set}$ ，此时系统吸收或放出热量  $Q$  的计算公式为

$$Q = C_{building}(T_{set} - T_{set0}) \quad (3)$$

式中： $C_{building}$  为建筑物等效热容。

若室内温度升高至  $T_{max}$  时，空调将达到最大放电深度，此时电量已全部消耗完毕。基于此，空调负荷虚拟储能储电量  $E_{ac}(t)$  和额定容量  $E_{ac-N}$  的计算公式为

$$E_{ac}(t) = \frac{C_{building}(T_{max} - T_r(t))}{\eta} \quad (4)$$

$$E_{ac-N} = \frac{C_{building}(T_{max} - T_{min})}{\eta} \quad (5)$$

$T_r$  与空调负荷的虚拟荷能状态  $S_{OVEac}(t)$  之间存在对应关系，其表达式为

$$S_{OVEac}(t) = \frac{E_{ac}(t)}{E_{ac-N}} = \frac{T_{max} - T_r(t)}{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

综上所述， $S_{OVEac}(t)$  可用于实时衡量  $E_{ac}(t)$ 。若空调负荷不参与响应时，虚拟储能功率为 0；若空调负荷参与响应时，其虚拟储能功率  $P_{ves}$  可由暂稳态功率的差值表示，即

$$P_{ves}(t) = P_{ac-s}(t) - P_{ac-o}(t) \quad (7)$$

通过式 (1) (2) (7) 的推导，可得空调负荷虚拟储能功率为

$$P_{ves}(t) = \begin{cases} -\frac{T_{out}(t) - T_r(t)}{\eta R}, & T_{set}(t) > T_r(t) \\ P_{rated} - \frac{T_{out}(t) - T_r(t)}{\eta R}, & T_{set}(t) < T_r(t) \end{cases} \quad (8)$$

根据式 (3) (8)，假设在短时间内  $T_{out}(t)$  保

持不变，若房间温度从  $T_{set0}$  变化至  $T_{set}$  时，VES 充放电时间  $\Delta t_{dr}$  为

$$\Delta t_{dr} = \begin{cases} RC_{building} \ln\left(\frac{T_{out} - T_{set}}{T_{out} - T_{set0}}\right), & T_{set} > T_{set0} \\ RC_{building} \ln\left(\frac{T_{out} - Q_{ac}R - T_{set0}}{T_{out} - Q_{ac}R - T_{set}}\right), & T_{set} < T_{set0} \end{cases} \quad (9)$$

### 3) 其他考虑因素。

现有文献额外考虑了其他因素如空调压缩机频率、室外温度、建筑物结构等，对上述所建的空调-建筑物虚拟储能模型进行了补充和完善。文献<sup>[17, 20]</sup>分析了室外温度对空调虚拟储能量的影响，研究表明两者之间具有很强的相关性和时效性。文献<sup>[15, 21-22]</sup>考虑了建筑物的围护结构和室内家具材料，建立了双参数模型表征室内空气与围护结构及家具材料外表面的热交换过程；文献<sup>[23]</sup>综合考虑建筑物传热因素，建立了建筑物室内温度的动态变化模型。文献<sup>[11, 24-25]</sup>将空调压缩机频率作为中间变量，以电功率与制冷量的线性函数模型为基础，建立空调负荷的虚拟荷能状态离散模型，其中文献<sup>[11]</sup>对多个分散温控负荷进行了虚拟储能聚合控制。

#### 2.1.2 其他温控负荷虚拟储能模型

其他温控负荷与空调负荷类似，均通过改变自身的出力来调节周围温度的大小，从而体现蓄放能特性。因为温度具有一定的可调节域，所以温控负荷出力也具有功率可调性，例如电热水器水温上下限决定电热水器负荷出力的可调域，食物可接受的冷藏温度决定冰箱负荷的出力范围，室内温度的上下限决定热泵负荷的出力值。但各种温控负荷物理特性和功能不同，导致热泵、冰箱和空调等在 VES 建模细节上略微存在差异<sup>[26]</sup>，且针对其他温控负荷虚拟储能特性的研究也相对较少。

针对热泵负荷，其虚拟储能特性与空调最为类似，不同之处在于空调 VES 特性主要用于降低室温，热泵 VES 特性主要用于升高室内温度。因此通常将热泵开关状态与室内温度相结合，从而建立热泵 VES 模型<sup>[27]</sup>。研究发现，通过对热泵储能和蓄电池储能协调控制，可以有效平抑微网联络线功率的波动<sup>[28]</sup>，但在实际应用中需要考虑开关状态转换次数对热泵 VES 特性的影响；针对冰

箱负荷，其虚拟储能特性主要体现在冷藏温度的变化<sup>[29]</sup>。通过建立冰箱功耗与冷藏温度可调节域的数学模型，可以有效预测冰箱 VES 额定容量<sup>[30]</sup>，从而应用于电网调度中。针对热水器负荷，通过构建基于水温可调的热水器 VES 模型，并应用于园区 IES 中，可以有效改善系统经济性<sup>[31]</sup>和电力系统频率特性<sup>[32]</sup>。

## 2.2 基于充放电时段可调的电动汽车虚拟储能建模方法

电动汽车是一种十分灵活的需求响应资源，根据消费者心理，在电价引导的政策下，可刺激车主改变用电方式，使电动汽车进行有序充放电工作，以满足车主使用习惯为前提对电动汽车充放电进行集中有序控制，达到能量时移和削峰填谷的效果<sup>[33]</sup>。因此电动汽车储能特性更为明显：为了出行需要电动汽车从电网侧充电，闲置时电动汽车向电网放电，其充放电行为与蓄电池更为接近。为了突出电动汽车的 VES 特性，现有文献主要从电动汽车响应电网电价和满足用户出行需求的角度出发建立电动汽车 VES 模型。

电动汽车日行驶里程和出行返程时刻服从对数正态分布<sup>[34-35]</sup>，在满足车主出行需求的情况下，充分利用分时电价引导，与电网积极互动。通过蒙特卡洛模拟法，将第  $i$  辆电动汽车出行返程时刻  $t_f$  与早电价低谷结束时刻  $T_{ms}$  和晚电价高峰起始时刻  $T_{ns}$  进行对比。根据谷电充电，峰电放电的原理，合理安排电动汽车 VES 充电起始时刻  $T_{chars}(i)$  和放电起始时刻  $T_{dchars}(i)$  为

$$\begin{cases} T_{chars}(i) = t_f(i), & (0 \leq t_f(i) < T_{ms}) \\ T_{dchars}(i) = T_{ns}, & (T_{ms} \leq t_f(i) \leq T_{ns}) \\ T_{dchars}(i) = t_f(i), & (T_{ns} \leq t_f(i) < 24) \end{cases} \quad (10)$$

其中电动汽车 VES 的放电电量  $E_{dchar}(i)$ <sup>[36]</sup> 和放电时长  $T_{dchar}(i)$  可表示为

$$E_{dchar}(i) = \min \left\{ (S_{OCev}^{\max} - S_{OCev}^{\min}) C_{ev} - S(i)w, rC_{ev} \right\} \quad (11)$$

$$T_{dchar}(i) = \frac{(S_{OCev}^{\max} - S_{OCev}^{\min}) C_{ev}}{P_{ev}} - \frac{S(i)w}{P_{ev}} \quad (12)$$

式中： $C_{ev}$  为电动汽车电池的总容量； $P_{ev}$  为电动汽车的充放电功率； $w$  为每行驶 1 km 的耗电量； $r$  为最大放电深度； $S_{OCev}^{\max}$ 、 $S_{OCev}^{\min}$  为电动汽车电池的荷电状态的上限值和下限值； $S(i)$  为第  $i$  辆电动

汽车的日行驶里程。

结合对电动汽车在电价峰谷时段参与 VES 的约束，可得到电动汽车 VES 放电结束时刻  $T_{dchare}(i)$  和充电结束时刻  $T_{chare}(i)$ <sup>[37-38]</sup> 表示为

$$T_{dchare}(i) = T_{dchars}(i) + T_{dchar}(i) \quad (13)$$

$$T_{chare}(i) = T_{chars}(i) + \left\lceil \frac{\sum_{t=T_{dchars}(i)}^{T_{dchare}(i)} P_{ev} + S(i)w}{P_{ev}} \right\rceil \quad (14)$$

根据式 (10) ~ (14) 可求得不同时段电动汽车 VES 充放电电量  $E_{ev}(t)$  为

$$E_{ev}(t) = \sum_{t=T_1}^{T_2} P_{ev}, \begin{cases} T_1 = T_{chars}, T_2 = T_{chare} & \text{充电} \\ T_1 = T_{dchars}, T_2 = T_{dchare} & \text{放电} \end{cases} \quad (15)$$

电动汽车的虚拟荷能状态  $S_{OVEv}(t)$  为

$$S_{OVEv}(t) = S_{OVEv}(t-1) + \frac{E_{ev}(t)\eta_{ev}}{C_{ev}} \quad (16)$$

式中： $\eta_{ev}$  为电池充放电效率。

由于电动汽车的虚拟储能特性指标受用户意愿影响较大，需要考虑用户行为和充放电需求的不确定性。文献 [24, 39-40] 结合各类电动汽车车主的用车习惯如接入与驶离时间、日行驶里程数等，对电动汽车 VES 指标进行冗余约束，并通过聚合控制，减少单个电动汽车响应行为的不确定性，进一步提高了系统的鲁棒性和稳定性。其中文献 [40] 通过设置电动汽车参与虚拟储能响应度来表征电动汽车车主响应虚拟储能服务的程度。文献 [41] 通过构建消费者心理学模型，将用户响应量作为确定性量来处理。

此外，通过设定适当的用户激励机制，如计入用户在降低电网负荷波动中的奖励机制<sup>[42]</sup>、差异化服务费激励机制<sup>[43]</sup>、调峰补偿机制<sup>[44]</sup>等，也可提高用户参与虚拟储能响应服务的积极性。从宏观角度来看，价格和激励 2 种响应下的电动汽车虚拟储能建模原理相同，都是综合考虑用户的经济效益后，对各个时段的充放电状态重新规划，没有对单一激励机制下的电动汽车虚拟储能模型进行构建。后续可将各种激励因素引入上述电动汽车 VES 模型中，从而更加直观地反映激励机制对电动汽车虚拟储能特性指标的影响。

## 2.3 基于转速可调的旋转电机虚拟储能建模方法

旋转电机在转子转速调节过程中，通过存储和释放动能来调整其自身功率，表现出与 ES 相

似的能量调节能力。因此，从理论上讲，可将其视为 VES，即转子转速升高，可等效成蓄电池充电；转子转速下降，可等效成蓄电池放电。基于此，本节以 IES 中荷端旋转负荷和源端风电机组为研究对象，构建以转速为调节变量的旋转可调节负荷虚拟储能模型。

### 2.3.1 荷端旋转负荷虚拟储能模型

旋转负荷作为 VES 时，可与储能装置协同分担系统的不平衡功率。与电动机转速变化对应的旋转动能改变模拟储能充放电调节能力，机械动能与电容器储能间建立的能量关系为

$$E_{kam} = \int \frac{J_S \omega_r}{p_n^2} \frac{d\omega_r}{dt} dt = \int U_C \frac{J_S \omega_r}{p_n^2 U_C} \frac{dU_C}{dt} dt = \int U_C C_{am} \frac{dU_C}{dt} dt = E_{Cam} \quad (17)$$

$$C_{am} = \frac{J_S \omega_r}{p_n^2 U_C} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (18)$$

式中： $E_{kam}$  为旋转负荷的机械动能； $E_{Cam}$  为旋转负荷 VES 具备的虚拟能量； $J_S$  为电动机转子的转动惯量； $\omega_r$  为电角速度； $p_n$  为极对数； $C_{am}$  为 VES 电容值； $U_C$  为电容电压。

从能量角度定义旋转负荷的虚拟荷能状态  $S_{OVEam}$  为

$$S_{OVEam} = \frac{E_{Cam}}{E_{CNam}} = \frac{J_S \omega_r^2 / (2p_n^2)}{J_S \omega_{rN}^2 / (2p_n^2)} = \frac{\omega_r^2}{\omega_{rN}^2} \quad (19)$$

式中： $\omega_{rN}$  为电机的额定电角速度； $E_{CNam}$  为旋转负荷 VES 的额定能量。

目前，旋转负荷 VES 技术在直流微电网场景下的海水淡化负荷控制中得到了广泛研究和应用，依靠能量储存和释放的方式，并通过储、荷协调控制，实现负荷的平衡和优化，可有效提升直流微电网系统运行效率和稳定性<sup>[45]</sup>。旋转负荷的虚拟储能特性主要体现在转子转速上，且该类负荷种类众多，通常应用于综合用能工业生产当中。产品的生产质量和效率通常与电机转速挂钩，当电机处于额定转速时，效率最高，转速升高或下降时，效率都会有所降低，因此为了生产利益，工业厂家不会轻易改变电机负荷的日常运行状态，旋转负荷的虚拟储能特性就难以充分发

挥，其应用场景的局限性较大。因此为了促进旋转负荷的 VES 利益化应用，应积极推进其 VES 的商业模式和市场机制创新，不断完善 VES 的市场化管理细则，以合理的激励方式引导工业用户参与旋转负荷的 VES 调节。

### 2.3.2 源端风电机组虚拟储能模型

来自源端的风电机组也具有荷端旋转负荷的调速特性，因此可视为 VES，且 VES 建模原理与旋转负荷相似。对比旋转负荷，风电机组的能量转换关系可表示为

$$E_{kwd} = \int U_C \frac{3k_{opt} \omega_W^2}{U_C} \frac{d\omega_W}{dt} \frac{dU_C}{dt} dt = \int U_C C_{wd} \frac{dU_C}{dt} dt = E_{Cwd} \quad (20)$$

式中： $E_{kwd}$  为风电机组的机械动能； $k_{opt}$  为风电机组的最大功率曲线系数； $\omega_W$  为发电机转子电角速度； $C_{wd}$  为风电机组的虚拟电容值； $E_{Cwd}$  为风电机组 VES 具备的虚拟能量。

根据上式可得风电机组的虚拟电容值为

$$C_{wd} \approx \frac{2k_{opt} \Delta(\omega_W^3)}{\Delta(U_C^2)} = 2k_{opt} \frac{(\omega_W^*)^3 - \omega_W^3}{\Delta(U_C^2)} \quad (21)$$

式中： $\omega_W^*$  为发电机转子转速参考值。

与旋转负荷类似，风电机组的虚拟荷能状态  $S_{OVEwd}$  可表示为

$$S_{OVEwd} = \frac{\omega_W^2}{\omega_{WN}^2} \quad (22)$$

式中： $\omega_{WN}$  为发电机转子额定转速。

与旋转负荷类似，风机发电效率与转子转速密切相关，当在利用风电机组的虚拟储能特性时，其效率会有所下降，两者之间存在矛盾。此外，风电机组转动惯量较小，其调控特性弱于旋转电机，当电网受到干扰或故障时，风电机组抵抗外界扰动的能力较差，若此时通过调节转速进行 VES 控制，可能会对电网产生大的波动和破坏稳定性，因此虽然源端风电机组具有一定的虚拟储能特性，但是在实际建模和应用中，还要考虑对电网安全运行的影响。

## 2.4 基于供回水温度可调的供热管网虚拟储能建模方法

针对 IES 能量传输网络虚拟储能建模，其对



象不再是单一的设备，而是由多种要素构成的复杂网络。热网、冷网、气网和水网作为传输能量的通道，包含着大量管道和能源转换设备。传输介质具有一定的惰性，导致产能与用能之间具有一定的延时特性，因此可将上述能源网络视为天然的储热、储冷、储气和储水装置，发挥其虚拟储能特性<sup>[46]</sup>。其中现有研究大多针对供热管网的虚拟储能特性进行研究<sup>[47]</sup>，其他能源网络传输特性与热网相似，因此本节主要研究供热管网的虚拟储能模型。

目前国内外相关学者提出了热力管网虚拟储热的概念，并基于能量守恒方程建立了 VES 模型<sup>[48-50]</sup>，如文献<sup>[49]</sup>将热网管道等效为多个蓄热装置串联而成的集成式蓄热装置；文献<sup>[50]</sup>将热网的储热特性以回水温度的变化来体现。相关文献基本上都以管道温度来表征供热管网的储热特性，即管道温度升高，热网蓄热；管道温度下降，热网放热，但仍缺乏对管网储放热过程的系统性分析，对管网虚拟储热能力的定量计算研究较少。本文主要参考文献<sup>[51]</sup>构建较为详细的供热管网 VES 模型，并对其进行量化分析。

#### 1) 供热管网虚拟储热罐建模。

将一次供热管道视为控制容积，且内部水温均匀分布，应用一阶隐式迎风格式对有限元法中的热网动态偏微分方程差分化，即时间偏导数用隐式差分代替，将空间偏导数用迎风差分代替。其差分模型为

$$\frac{T_t - T_{t-1}}{\Delta t} + \frac{m}{\rho A} \frac{T_t^{\text{out}} - T_t^{\text{in}}}{L} + \frac{T_t - T_t^a}{c_p \rho A R_p} = 0 \quad (23)$$

式中： $T_t^{\text{in}}$ 、 $T_t^{\text{out}}$ 分别为 $t$ 时刻管道的入口水温与出口水温； $T_t = (T_t^{\text{in}} + T_t^{\text{out}})/2$ 为 $t$ 时刻管道的平均水温； $\rho$ 为水的密度； $A$ 为管道的内横截面积； $m$ 为质量流率； $L$ 为管道的长度； $c_p$ 为水的比热容； $T_t^a$ 为 $t$ 时刻的环境温度； $R_p$ 为管道的总热阻。

将供回水管网视为 2 个虚拟储热罐，则式(23)不再对应某一具体管道，而是对应以下 2 个储热罐模型，即

$$\frac{T_t^S - T_{t-1}^S}{\Delta t} + \frac{m}{\rho A} \frac{T_t^{S,\text{out}} - T_{t-1}^{S,\text{in}}}{L} + \frac{T_t^S - T_t^a}{c_p \rho A R_p} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{T_t^R - T_{t-1}^R}{\Delta t} + \frac{m}{\rho A} \frac{T_t^{R,\text{out}} - T_{t-1}^{R,\text{in}}}{L} + \frac{T_t^R - T_t^a}{c_p \rho A R_p} = 0 \quad (25)$$

式中： $T_t^S = (T_t^{S,\text{in}} + T_t^{S,\text{out}})/2$ 表示供水管道虚拟储热罐的平均水温； $T_t^R = (T_t^{R,\text{in}} + T_t^{R,\text{out}})/2$ 表示回水管道虚拟储热罐的平均水温； $T_t^{S,\text{in}}$ 、 $T_t^{S,\text{out}}$ 分别为供水管道虚拟储热罐的入、出口水温； $T_t^{R,\text{in}}$ 与 $T_t^{R,\text{out}}$ 分别为回水管道虚拟储热罐的入、出口水温。

由热力系统热功率守恒，可得供热管网的虚拟储热罐蓄放热功率 $h_t^{\text{HN}}$ 为

$$h_t^{\text{HN}} = h_t^S - h_t^L - h_t^{\text{loss}} \quad (26)$$

式中： $h_t^S$ 为 $t$ 时刻热源功率； $h_t^L$ 为 $t$ 时刻供热系统热负荷； $h_t^{\text{loss}}$ 为 $t$ 时刻供热系统热损耗。 $h_t^{\text{HN}} > 0$ 表示热源出力高于热负荷，供热管网进行储热； $h_t^{\text{HN}} < 0$ 表示热源出力低于热负荷，供热管网进行放热，满足用户的热负荷需求。

#### 2) 供热管网虚拟储热量化。

为了刻画供热管网储热水平，根据上一项建立的虚拟储热罐模型，推导其虚拟储热状态 (state of virtual thermal storage, SOVTS) 指标。由上一项可知，供热管网的虚拟储热量宏观上可由供热量和耗热量之差决定，其本质上受管道温度的影响，具有一定的极限值。首先，设定基准温度，定义供水管网与回水管网的储热量为

$$Q_t^S = c_p \rho V^S (T_t^S - T^{S,\text{ref}}) \quad (27)$$

$$Q_t^R = c_p \rho V^R (T_t^R - T^{R,\text{ref}}) \quad (28)$$

式中： $Q_t^S$ 与 $Q_t^R$ 分别为供、回水管网的实时储热量； $V^S$ 与 $V^R$ 分别为供、回水管网的水容量； $T^{S,\text{ref}}$ 与 $T^{R,\text{ref}}$ 为基准温度。

为保障供热系统安全稳定运行，根据设计规范设定供回水温度上下限，从而确定管网储热量的上下限。以供水管道为例，储热量的上下限为

$$Q^{S,\text{max}} = c_p \rho V^S (T^{S,\text{max}} - T^{S,\text{ref}}) \quad (29)$$

$$Q^{S,\text{min}} = c_p \rho V^S (T^{S,\text{min}} - T^{S,\text{ref}}) \quad (30)$$

式中： $Q^{S,\text{max}}$ 、 $Q^{S,\text{min}}$ 分别为供水管网储热量的上下限值，由供水温度上下限 $T^{S,\text{max}}$ 、 $T^{S,\text{min}}$ 决定；类似地，回水管网储热量的上下限 $Q^{R,\text{max}}$ 、 $Q^{R,\text{min}}$ 由回水温度上下限 $T^{R,\text{max}}$ 、 $T^{R,\text{min}}$ 决定。因此，供热系统一次热网的虚拟储热量可表示为 $(Q_t^S + Q_t^R)$ ，进而得出热力管网的虚拟储热状态指标 $S_{\text{OVTS}}(t)$ 为

$$SOVTS(t) = \frac{(Q_t^S + Q_t^R) - (Q^{S,\min} + Q^{R,\min})}{(Q^{S,\max} + Q^{R,\max}) - (Q^{S,\min} + Q^{R,\min})} \quad (31)$$

式中：假设供回水管网的水容量相等，可进一步简化为

$$SOVTS(t) = \frac{(T_t^S + T_t^R) - (T^{S,\min} + T^{R,\min})}{(T^{S,\max} + T^{R,\max}) - (T^{S,\min} + T^{R,\min})} \quad (32)$$

上述供热管网的虚拟储能模型是以单热源，辐射状热网结构为基础建立的，缺少对多热源，环形复杂热力网络<sup>[52]</sup>的研究，且供热管网 VES 模型大都以调节供回水温度为前提进行调控，但是该调节方式需要保证热网流量处于较高的流速，从而导致循环泵转速较高，耗电量较大。因此有少数文献对基于流量调节的热网 VES 模型进行研究<sup>[53-54]</sup>，研究表明：所提出的调节方式和调度方法可以实现热损功率和循环系统用电功率整体优化，相较温度调节方式具有更好的经济性和灵活性。但是频繁的流量调节极易会造成热网的水力失调，破坏热力系统的稳定性，所以目前仍以温度调节方式下热力管网 VES 研究为主。

综上所述，本文针对 IES 内具有储能特性的源、荷、网端设备和系统的虚拟储能建模方法进行了归纳和分析。虚拟储能和实体储能的相关指标对比如表 2 所示。

表 2 虚拟储能和实体储能的相关指标对比

Table 2 Comparison of related indexes between virtual energy storage and physical energy storage

虚拟储能类型	充放能功率	储能容量	充放能时间	荷能状态
实体储能	参与电力调度的可调节功率	由自身物理或化学储能特性决定	与设备参数有关	剩余电量与额定容量的比值
温控负荷	暂态功率与稳态功率的差值	取决于可调温度上下限	与体感温度变化速度有关	实时温度差与用户舒适度区间的比值
电动汽车	可参与需求响应量	取决于最大充电时长	与用户用能特性有关	剩余可响应量与最大可响应量的比值
旋转电机		取决于转子转速上下限	与转子转动惯量有关	转子转速与额定转速的平方比
供热管网	受热源功率、管网热损耗和热负荷需求的影响	取决于供水温度上下限	与热媒温度变化速度有关	热媒温度与管道承受温度上下限的比值

### 3 虚拟储能应用场景分析

由第 1 章对虚拟储能的介绍，VES 可以通过改变其充放能功率，在 IES 系统中发挥着重要作用。然而，由于 IES 规模庞大，涉及的源网荷储设备种类较为复杂，可视为 VES 的能源设备和网络也较多，现有研究尚未充分利用 IES 的所有 VES 资源，其应用规模也仅仅针对 IES 内的一个子系统，VES 的应用场景也根据研究对象的不同而存在差异。因此本节重点分析虚拟储能 4 种典型应用场景和优化策略。

#### 3.1 经济调度

虚拟储能在 IES 中的应用主要是为了减少综合能源系统的总运行成本。VES 设备通常应用于综合用能城市或工业园区，以某一设备或多类设备群构成的 VES 系统，参与用能调度<sup>[11,55]</sup>；供热管网或建筑物的虚拟储热特性通常应用于考虑网络架构的电-热-气综合能源系统中，与热电联产机组（combined heat and power, CHP）和能源转化设备（电锅炉、热泵等）等联合调控，通过响应峰谷平电价，调整热出力，将热量进行储存或释放，以系统运行成本最低为目标进行优化调度<sup>[7,56]</sup>。例如文献<sup>[57]</sup>通过挖掘在分时电价的激励下，供热管网的虚拟储能特性参与电-热 IES 经济运行的调节潜力，充分利用电、热系统的能源互补特性，降低 IES 的运行成本。其通用目标函数基本可表示为

$$F = \min(C_{\text{buy}} + C_{\text{maintain}} + C_{\text{VES}}) \quad (33)$$

式中： $F$  为最小值函数； $C_{\text{buy}}$  为购能成本； $C_{\text{maintain}}$  为运行维护成本； $C_{\text{VES}}$  为 VES 调用成本。

由于不同文献考虑因素的差异性，其经济优化调度目标函数也并不相同，但基本都以式（33）为基础，附加其他成本模块构成该场景下的经济调度优化策略。如通过引入用户温度舒适度惩罚成本模块<sup>[58]</sup>，可以降低冷热电联供楼宇的运行成本；通过引入 CHP 机组运行区间偏差惩罚成本模块<sup>[59]</sup>，并利用供热系统 VES 特性，从而充分提高电热联合系统运行灵活性和经济性；通过引入弃风成本模块<sup>[60]</sup>，并利用供热管网和建筑物的虚拟储热特性，可以大大降低系统的运行成本和弃风电量。





### 3.2 平滑联络线功率

由于可再生能源发电和用电负荷的不确定性，导致联络线功率存在偏差，通过 VES 可在一定程度上消除这种偏差<sup>[28]</sup>。文献 [61] 考虑办公楼宇储能，根据日前和小时级调度与实际方案不匹配特性，提出了一种用于办公楼宇微网联络线的功率平滑控制方法。文献 [62] 考虑空调负荷的虚拟储能特性，提出了以风电-储能-集群空调负荷联合系统出力为滑模面的变结构滑动模块跟踪控制策略来实现联合出力的平滑输出，以减少微网联络线功率波动。文献 [63] 在城市园区微网系统中，考虑空调负荷虚拟储能和储能电池的协同运行特性，提出了基于连续状态变量约束的最优控制策略，其目标函数为

$$J = \min \int (y_{\text{ref}} - y)^2 dt \quad (34)$$

式中： $y_{\text{ref}}$  为发电与用电偏差参考值； $y$  为实际值。该方法通过最优控制实现了联络线功率的精确追踪。

### 3.3 频率调整和电压改善

分布式能源出力降低了系统惯性，其输出增加时，若电网侧无法响应，电网频率可能会降低，电压也会产生波动，从而影响电网的稳定性。通过 VES 技术可以应对这些难题，从而调整频率<sup>[29,37]</sup> 和改善电压水平<sup>[12]</sup>。

针对频率调整，以 VES 下垂控制策略作为基础来均衡系统的频率，即系统频率升高时，VES 单元放电数量或系统放电功率减少；当系统频率降低时，VES 单元放电数量或系统放电功率增加<sup>[29]</sup>。其控制原理可表示为

$$\Delta P_{\text{VES}} = -K_f \frac{(f - f_N)}{f_N} P_{\text{VES},N} \quad (35)$$

式中： $\Delta P_{\text{VES}}$  为 VES 的充放电功率变化量； $K_f$  为 VES 的频率调节系数； $f$  为电网的实时频率； $f_N$  为电网的额定频率； $P_{\text{VES},N}$  为 VES 额定充放电功率。以式 (35) 为基础，文献 [64] 协调控制空调负荷群和电池储能系统，提出了一种适用于 VES 的模糊控制策略来提高电力系统频率稳定性。根据区域控制误差，可将非合作博弈应用于二次频率调节，实例表明，该方法具有良好的频率调节性能<sup>[65]</sup>。

针对电压改善，也可通过下垂控制策略保证母线电压在可接受偏差范围之内（偏差通常为

5%~10%）或直接以节点电压波动最小作为目标函数进行优化<sup>[66]</sup>，其目标函数可表示为

$$f(V_N) = \min \begin{cases} \sum_{i=1} \sum_{i=1} [V_N^2 - (V_{i,t}/V_N)^2], & V_{i,t} \leq V_N \\ \sum_{i=1} \sum_{i=1} [(V_{i,t}/V_N)^2 - V_N^2], & V_{i,t} > V_N \end{cases} \quad (36)$$

式中： $V_N$  为节点电压额定值； $V_{i,t}$  为实时节点电压值。基于此，文献 [22] 中提出了一种两级共识驱动的分分布式控制策略，协调 VES 以避免电压的越限。实体储能参与电网调压遵循“分层分区、就地平衡”的原则，引入虚拟储能后，也可采用分层调度的优化策略来平衡电压。在较低层次，所有 VES 都由对应的聚合商控制；在较高层次，聚合商将由电力系统根据协调控制目标进行控制<sup>[21]</sup>。此外，为了获得更好的控制效果，VES 通常与传统的 ES 进行联合控制，以创造更大的灵活性。因此，应进一步研究不同类型 VES 之间以及 VES 与传统 ES 之间的协调控制策略<sup>[67]</sup>。

### 3.4 新能源消纳

由于可再生能源出力波动性较大，源荷不匹配现象较为严重，通过引入虚拟储能，调节充放电功率从而提高新能源的消纳水平<sup>[68]</sup>。文献 [69] 提出了一种基于热网储热特性的两阶段电-热系统联合调度策略，从而提高机组的调峰能力，减少弃风。在实际应用中通常以弃风或弃光成本应用于 VES 的经济调度中，在实现系统经济运行的同时，提高新能源的消纳率。体现新能源消纳的目标函数可表示为

$$F = \min \left( \sum_{t=1}^T P_t^{\text{cut}} \right) \quad (37)$$

式中： $P_t^{\text{cut}}$  为  $t$  时段的弃风或弃光量。

在 IES 优化调度中，合理利用供热管网的虚拟储能潜力可以有效提高系统新能源的消纳能力。供热管网作为天然的储热装置，在一定条件下可取代实体储热装置，从而节约建设投资成本。此外，供热管网协调实体储热以及具有热惯性的供热建筑物，能显著增加系统的综合储热容量，从而充分提高系统的经济性和消纳弃风的能力。

虚拟储能典型应用场景和优化策略如图 3 所示。

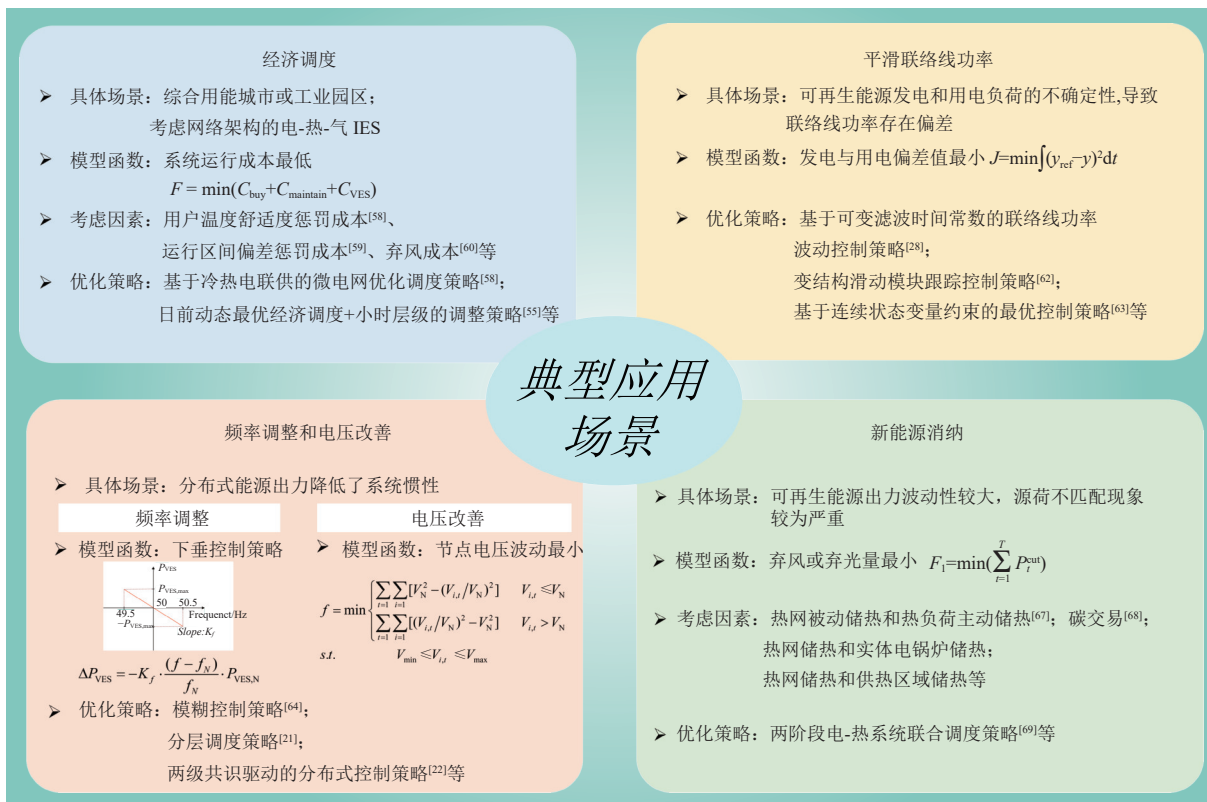


图 3 虚拟储能典型应用场景和优化策略

Fig. 3 Typical application scenarios and optimization strategies of virtual energy storage

## 4 虚拟储能下一步研究方向

目前, VES 技术主要应用于 IES 的优化调度中, 通过对 IES 的电、热、冷、气、水等各种异构的能源要素进行数字化抽象和虚拟化, 从而把物理上和化学上特性各异的能源进行归一化整合, 实现 IES 能源的时空可变、粒度可控的动态优化调度。但在未来新型电力系统下, 虚拟储能建模和运行控制需进一步研究和完善。本节根据上述所归纳的 VES 建模方法和应用场景, 提出以下 4 点研究方向。

### 4.1 考虑家用温控负荷虚拟储能系统协同控制模型和策略

目前针对温控负荷 VES 研究多针对空调负荷, 鲜有对冰箱、热水器和热泵等其他温控负荷 VES 特性展开具体分析。虽然温控负荷具有相似的物理特性和动态过程, 但是具体到某个设备时仍然存在差异, 彼此之间相互影响。温控负荷的制冷或制热状态增加了热平衡的复杂性, 导致家用温控负荷虚拟储能系统的协同控制是一个复杂

的问题, 需要考虑到多种因素的影响, 因此有很多待研究的方向。例如, 家用温控负荷的负载特征和变化规律是非常复杂的, 需要更加准确的 VES 特性指标值的预测方法; 不同温控负荷之间具有较强的互相关联性, 需要开发出更加智能的协同控制策略; 家用温控负荷的负载特征和用电行为具有很大的不确定性, 需要采用更加鲁棒性的控制方法。

总之, 家用温控负荷的协同控制是 IES 综合用能领域中的重要研究方向, 通过构建 VES 模型和协同控制策略, 可以提高用能效率, 降低系统成本, 实现资源的优化配置。未来的研究应该进一步完善家用温控负荷的 VES 模型和优化策略, 实现智能化、安全化和高效化的电能管理。

### 4.2 融入多能源设备及网络的虚拟储能系统建模

现有研究大多将 VES 应用于 IES 的经济调度中, 但实际建模对象和应用场景并未包含整个 IES, 仅局限于某一微网系统中。例如针对综合用能单元的 VES 优化调度, 不仅要考虑多种温控负荷的 VES 特性, 还要涉及建筑物楼宇的虚拟储热



特性<sup>[58]</sup>；当考虑到源端，还需考虑风电机组的 VES 调节特性；若进一步引入能源网络的影响，还须牵扯热、气、冷、水网的储能特性，且现有文献多针对供热管网的虚拟储能特性进行研究，缺少对其他惰性管网的 VES 分析。

由于在 IES 中源网荷储均通过能源转换进行耦合，能源之间相互影响，单一设备或网络的 VES 模型无法反映整个虚拟储能系统，考虑的设备或网络的种类越多，其 VES 建模就越复杂。未来在研究较大范围 IES 的优化调度时，应充分考虑多能源设备和网络的相互影响，根据设备耦合特性和能源传输、转换特性建立较为全面的虚拟储能系统模型。

#### 4.3 基于集中-分布多层级的虚拟储能控制方法

针对大规模的 VES 控制，由于各类负荷地理上的分散性，很难通过复杂的通信系统进行控制，即使可以集中控制<sup>[27]</sup>，也存在较大的通信延迟。而电力系统频率控制领域要求配置的储能系统要具有快速响应特性，与大规模 VES 长延时特性匹配相矛盾<sup>[29]</sup>。

为解决该问题，在 VES 控制中可引入集中-分布多层级控制技术<sup>[11]</sup>。在分布层，所有 VES 单元被划分为由不同边缘节点控制的不同组；在集中层，所有边缘节点接收并执行来自终端平台的控制策略。这种控制模式既能实现 VES 的统一调度，也可以提高 VES 的响应速度，大大降低对通信容量的需求。然而如何准确划分各 VES 组别以及针对分布层不同特性的 VES 单元如何有序调节尚未明确，因此为提高 VES 的经济有效性，将集中-分布多层级控制技术更深入地融合到 VES 中是研究大规模 VES 控制方法的重点。

#### 4.4 涉及商业模式应用的虚拟储能控制策略

根据上述研究，通过调用 VES，在保证经济性的前提下，最大程度调节电网频率，维持电压稳定和平滑联络线功率波动，但大部分文献在研究 VES 应用场景时并未涉及市场机制和商业模式，仅以某一系统运行成本最低为目标，未对各市场主体在各类商业模式场景下如何调用 VES 进行具体分析。

为了促进 VES 的广泛利用，应大力推动 VES 商业模式的应用，通过商业化和市场化，刺激 VES 市场的发展。但是由于 VES 技术和相关政

策尚未成熟，各市场主体尚未充分挖掘其潜力，如热力公司主要通过供热管道向用户供暖并得到供暖费用，由于未享受到调用补贴以及避免利用热网储热损害热力管网而导致供暖收益下降<sup>[50]</sup>，热力公司不会轻易改变热网的运行状态。此外，由于缺少对应的 VES 商业代理机构，当涉及大规模的 VES 资源买卖时，在多能源市场下的涉及多利益主体的竞争会更为复杂。因此，在 VES 控制策略中涉及体现各方交易公平性和主动性的商业模式应用需进一步探索。

## 5 结论和展望

为了准确把握虚拟储能的研究重点，本文围绕综合能源系统下虚拟储能建模方法和应用场景的国内外研究现状进行了系统性分析，得出以下主要结论。

1) 虚拟储能是一种聚合 IES 源、网、荷灵活性设备或系统，以存储剩余能量或释放短缺能量，从而发挥与实体储能相同调节作用并平衡多种能源的等效归一化思想。虚拟储能技术的提出，为减小系统优化运行规模，提高电力系统经济性和可再生能源消纳能力，打破能源在时空上的差异性壁垒以及实现 IES 能源时空可变、粒度可控的动态优化调度提供了新思路。

2) 本文根据设备调控原理，主要分析基于室内温度可调的温控负荷、基于充放电时段可调的电动汽车、基于转速可调的旋转电机和基于供回水温度可调的供热管网 4 种设备的 VES 建模方法，总结了不同调控原理和方法下的虚拟储能特性指标。

3) 本文根据虚拟储能在不同场景中的实际应用，参考国内外相关文献，分析和归纳了虚拟储能 4 种典型应用场景，分别为经济调度、平滑联络线功率、频率调整和电压改善以及新能源消纳。

4) 针对目前虚拟储能的研究现状及未来发展趋势，对虚拟储能提出了下一步的研究方向。通过不断提高虚拟储能单元的建模精度以及丰富多能源设备和网络耦合的虚拟储能系统模型规模，融入多市场主体的市场机制和商业模式，采用集中-分布多层级的控制方法，充分发挥虚拟储能在未来新型电力系统中的灵活性调节作用。

参考文献:

- [1] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369–379.  
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369–379.
- [2] 国家能源局. 国家能源局 2023 年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2023-02-13)[2023-11-11]. [http://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c\\_1310697149.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm).
- [3] GUERRA K, HARO P, GUTIÉRREZ R E, *et al.* Facing the high share of variable renewable energy in the power system: flexibility and stability requirements[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118561.
- [4] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2256–2272.  
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, *et al.* Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2256–2272.
- [5] 孙伟卿, 向威, 裴亮, 等. 电力辅助服务市场下的用户侧广义储能控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 68–76.  
SUN Weiqing, XIANG Wei, PEI Liang, *et al.* Generalized energy storage control strategies on user side in power ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 68–76.
- [6] HAMZEH A F, WIJESORIYA M M, BEHNAM M I, *et al.* Optimal scheduling of multi-energy type virtual energy storage system in reconfigurable distribution networks for congestion management[J]. Applied Energy, 2023, 333: 120569.
- [7] 钟雅珊, 付聪, 钱峰, 等. 考虑广义储能和条件风险价值的综合能源系统经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 54–63.  
ZHONG Yashan, FU Cong, QIAN Feng, *et al.* Economic dispatch model of an integrated energy system considering generalized energy storage and conditional value at risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 54–63.
- [8] AMINI M, ALMASSALKHI M. Optimal corrective dispatch of uncertain virtual energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4155–4166.
- [9] XIE K, HUI H X, DING Y. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 23.
- [10] 孙毅, 李泽坤, 许鹏, 等. 异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7146–7158, 7488.  
SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, *et al.* Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7146–7158, 7488.
- [11] 李力, 董蜜, 宋冬然, 等. 分布式的温控负荷集群负荷跟随控制[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022: 1–13. (2022-12-16).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221215.1555.003.html>.  
LI Li, DONG Mi, SONG Dongran, *et al.* Distributed load-following control for thermostatically controlled loads clusters[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022: 1–13. (2022-12-16).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221215.1555.003.html>.
- [12] KANG W F, CHEN M Y, LAI W, *et al.* Distributed real-time power management for virtual energy storage systems using dynamic price[J]. Energy, 2021, 216: 119069.
- [13] 汤木易, 罗毅, 胡博, 等. 电热联合调度模型综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 161–175.  
TANG Muyi, LUO Yi, HU Bo, *et al.* A review of the dispatch model of a combined heat and power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 161–175.
- [14] 梁馨予. 考虑虚拟储能的区域综合能源系统运行优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.  
LIANG Xinyu. Research on optimal operation of regional integrated energy system considering virtual energy Storage[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [15] MENG K, DONG Z Y, XU Z, *et al.* Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in smart distribution networks for loading management[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(4): 776–786.
- [16] 高文浩, 赵海兵, 殷爽睿, 等. 考虑负荷虚拟储能特性的商业区储能优化配置[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 96–104.  
GAO Wenhao, ZHAO Haibing, YIN Shuangrui, *et al.* Optimal configuration of BESS in commercial area considering virtual energy storage characteristics of load[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 96–104.
- [17] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394–401.  
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, *et al.* Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394–401.



- [18] VIJAYALAKSHMI K, VIJAYAKUMAR K, NANDHAKUMAR K. Prediction of virtual energy storage capacity of the air-conditioner using a stochastic gradient descent based artificial neural network[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 208: 107879.
- [19] VIJAYALAKSHMI K, VIJAYAKUMAR K, NANDHAKUMAR K. An ensemble learning model for estimating the virtual energy storage capacity of aggregated air-conditioners[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 59: 106512.
- [20] 殷爽睿, 艾芊, 王大鹏, 等. 考虑空调负荷虚拟储能的产消者鲁棒日前申报策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(4): 24–34.  
YIN Shuangrui, AI Qian, WANG Dapeng, *et al.* Day-ahead robust bidding strategy for prosumer considering virtual energy storage of air-conditioning load[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 24–34.
- [21] WANG D X, MENG K, GAO X D, *et al.* Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in LV grids for voltage regulation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(6): 2452–2462.
- [22] WANG D, LAI C S, LI X, *et al.* Smart coordination of virtual energy storage systems for distribution network management[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, 129(4): 106816.
- [23] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 集成智能楼宇的微网系统多时间尺度模型预测调度方法 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(16): 25–33.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Model predictive control based multiple-time-scheduling method for microgrid system with smart buildings integrated[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(16): 25–33.
- [24] 朱佳男, 艾芊, 李嘉媚. 基于分布鲁棒优化的广义共享储能容量配置方法 [J/OL]. *电力系统自动化*, 1–11(2023-11-23).<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20231122.1036.006>.  
ZHU Jianan, AI Qian, LI Jiamei. Allocation method of generalized shared energy storage capacity based on distributed robust optimization[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*: 1–11(2023-11-23).<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20231122.1036.006>.
- [25] SONG M, GAO C W, YAN H G, *et al.* Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 5522–5534.
- [26] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于成本—效益分析的温控负荷需求响应模型与方法 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(5): 45–53.  
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, *et al.* Model and method of demand response for thermostatically-controlled loads based on cost-benefit analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(5): 45–53.
- [27] 栗子豪, 李铁, 吴文传, 等. 基于 Minkowski Sum 的热泵负荷调度灵活性聚合方法 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 14–21.  
LI Zihao, LI Tie, WU Wenchuan, *et al.* Minkowski sum based flexibility aggregating method of load dispatching for heat pumps[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 14–21.
- [28] 王冉, 王丹, 贾宏杰, 等. 一种平抑微网联络线功率波动的电池及虚拟储能协调控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(20): 5124–5134.  
WANG Ran, WANG Dan, JIA Hongjie, *et al.* A coordination control strategy of battery and virtual energy storage to smooth the micro-grid tie-line power fluctuations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(20): 5124–5134.
- [29] CHENG M, SAMI S S, WU J Z. Benefits of using virtual energy storage system for power system frequency response[J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 376–385.
- [30] KUMAR K N, VIJAYAKUMAR K, KALPESH C. Virtual energy storage capacity estimation using ANN-based kWh modelling of refrigerators[J]. *IET Smart Grid*, 2018, 1(2): 31–39.
- [31] 刘翕铭, 于永进, 杨洋. 基于改进麻雀算法的园区综合能源系统优化研究 [J]. *智慧电力*, 2021, 49(6): 9–16,82.  
LIU Ximing, YU Yongjin, YANG Yang. Optimization of regional integrated energy system based on improved sparrow algorithm[J]. *Smart Power*, 2021, 49(6): 9–16,82.
- [32] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于需求响应的集群温控负荷建模及参与低频减载策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(3): 751–759.  
QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, *et al.* Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(3): 751–759.
- [33] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑广义储能与火电联合调峰的日前—日内两阶段滚动优化调度 [J]. *电网技术*, 2021, 45(1): 10–20.  
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, *et al.* Two-stage day-ahead and intra-day rolling optimization scheduling considering joint peak regulation of generalized energy storage and thermal power[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 10–20.
- [34] 张祥宇, 舒一楠, 付媛. 基于虚拟储能的直流微电网源荷储多时间尺度能量优化与分区协调控制 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 6011–6024.

- ZHANG Xiangyu, SHU Yinan, FU Yuan. Multi-time-scale energy optimization and zone coordinated control of DC microgrid source-load-storage based on virtual energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6011–6024.
- [35] 张祥宇, 舒一楠, 付媛, 等. 含虚拟储能直流微电网的源荷储能协同优化控制 [J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3497–3506.
- ZHANG Xiangyu, SHU Yinan, FU Yuan, *et al.* Cooperative optimal control of source-load-storage energy in DC microgrid with virtual energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3497–3506.
- [36] 朱旭, 杨军, 李高俊杰, 等. 计及虚拟储能系统的区域综合能源系统优化调度策略 [J]. 电力建设, 2020, 41(8): 99–110.
- ZHU Xu, YANG Jun, LI Gaojunjie, *et al.* Optimal dispatching strategy of regional integrated energy system considering virtual energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(8): 99–110.
- [37] 湛归, 殷爽睿, 艾芊, 等. 智能楼宇型虚拟电厂参与电力系统调频辅助服务策略 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 13–20, 57.
- ZHAN Gui, YIN Shuangrui, AI Qian, *et al.* A strategy for smart building-based virtual power plants participating in frequency regulation auxiliary service[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 13–20, 57.
- [38] ZHU X, YANG J, LIU Y, *et al.* Optimal scheduling method for a regional integrated energy system considering joint virtual energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 138260–138272.
- [39] 李蓓, 赵松, 谢志佳, 等. 电动汽车虚拟储能可用容量建模 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2020, 50(6): 101–111.
- LI Bei, ZHAO Song, XIE Zhijia, *et al.* Electric vehicle virtual energy storage available capacity modeling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(6): 101–111.
- [40] 郭建府, 赵松, 韩晓娟. 基于冗余配置的电动汽车虚拟储能参与电网调峰研究 [J]. 热力发电, 2020, 49(8): 162–168.
- GUO Jianfu, ZHAO Song, HAN Xiaojuan. Research on electric vehicles virtual energy storage based on redundant configuration participating in power grid peak shaving[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 162–168.
- [41] 朱兰, 刘伸, 唐陇军, 等. 充放电不确定性响应建模与电动汽车代理商日前调度策略 [J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3305–3317.
- ZHU Lan, LIU Shen, TANG Longjun, *et al.* Modeling of charging and discharging uncertainty and research on day-ahead dispatching strategy of electric vehicle agents[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3305–3317.
- [42] 张建宏, 赵兴勇, 王秀丽. 考虑奖励机制的电动汽车充电优化引导策略 [J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 102–108, 118.
- ZHANG Jianhong, ZHAO Xingyong, WANG Xiuli. An optimization guidance strategy for electric vehicle charging considering the reward mechanism[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 102–108, 118.
- [43] 李飞, 梁宝全, 张旭东, 等. 面向电动汽车快充站服务效率的自适应动态激励机制 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 48–55.
- LI Fei, LIANG Baoquan, ZHANG Xudong, *et al.* Adaptive dynamic incentive mechanism for service efficiency of EV fast charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 48–55.
- [44] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 58–71.
- YANG Jingsi, QIN Wenping, SHI Wenlong, *et al.* Two-stage optimal dispatching of regional power grid based on electric vehicles' participation in peak-shaving pricing strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 58–71.
- [45] 张祥宇, 吴奇, 付媛. 含虚拟储能直流微电网的储荷协调控制技术 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 113–120.
- ZHANG Xiangyu, WU Qi, FU Yuan. Coordinated control technology of energy storage-load for DC microgrid with virtual energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 113–120.
- [46] 穆云飞, 唐志鹏, 吴志军, 等. 计及虚拟储能的电-水-热综合能源系统日前优化调度方法 [J/OL]. 电力系统自动化, 2023: 1–16. (2023-06-30).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230629.1528.002.html>.
- MU Yunfei, TANG Zhipeng, WU Zhijun, *et al.* Optimal day-ahead scheduling method for electricity water hot water integrated energy system considering virtual energy storage[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1–16. (2023-06-30).<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230629.1528.002.html>.
- [47] 邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 供热机组锅炉储能与热网储能空间时间多尺度分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 599–606.
- DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. Spatial and temporal multiscale analysis on energy storage in heat supply units' boiler and heat supply nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 599–606.
- [48] 王楠, 张辰, 何旭道, 等. 基于弃风消纳的热网主动储热优化 [J]. 中国电力, 2023, 56(2): 114–122.
- WANG Nan, ZHANG Chen, HE Xudao, *et al.* Optimization of active heat storage in heat-supply network considering curtailed wind power



- consumption[J]. *Electric Power*, 2023, 56(2): 114–122.
- [49] 陈乾, 张沈习, 程浩忠, 等. 计及热网蓄热特性的多区域综合能源系统多元储能规划 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(15): 5890–5902. CHEN Qian, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, *et al.* Multiple energy storage planning of multi-district integrated energy system considering heat storage characteristics of heat network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(15): 5890–5902.
- [50] 曾艾东, 王佳伟, 邹宇航, 等. 考虑供热管网储热的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J/OL]. *高电压技术*: 1–13(2023-04-27).<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20222086>. ZENG Aidong, WANG Jiawei, ZOU Yuhang, *et al.* Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering heat storage characteristics of heating network[J/OL]. *High Voltage Engineering*: 1–13(2023-04-27).<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20222086>.
- [51] 栗海润, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑量化储热的多区域电-热综合能源系统优化调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(增刊 1): 16–27. LI Hairun, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Optimal scheduling of multiregional integrated power and heating system considering quantified thermal storage[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 16–27.
- [52] 徐业琰, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(6): 152–163. XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, *et al.* Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 152–163.
- [53] XU F, HAO L, CHEN L, *et al.* Integrated heat and power optimal dispatch method considering the district heating networks flow rate regulation for wind power accommodation[J]. *Energy*, 2023, 263: 125656.
- [54] 杨秀, 汤金璋, 刘方, 等. 流量自适应方式下考虑热管道虚拟储能的电热能源系统优化调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(21): 8318–8332. YANG Xiu, TANG Jinzhang, LIU Fang, *et al.* Optimal scheduling of electrothermal integrated energy system considering virtual energy storage of thermal pipelines in flow adaptive mode[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(21): 8318–8332.
- [55] JIN X L, WU J Z, MU Y F, *et al.* Hierarchical microgrid energy management in an office building[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 480–494.
- [56] KOUHIA M, LAUKKANEN T, HOLMBERG H, *et al.* District heat network as a short-term energy storage[J]. *Energy*, 2019, 177: 293–303.
- [57] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法 [J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 132–142. WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, *et al.* Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 132–142.
- [58] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 581–591. JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, *et al.* Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 581–591.
- [59] 张磊, 罗毅, 罗恒恒, 等. 基于集中供热系统储热特性的热电联产机组多时间尺度灵活性协调调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(4): 985–998, 1275. ZHANG Lei, LUO Yi, LUO Hengheng, *et al.* Scheduling of integrated heat and power system considering multiple time-scale flexibility of CHP unit based on heat characteristic of DHS[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(4): 985–998, 1275.
- [60] 孙鹏, 滕云, 冷欧阳, 等. 考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6059–6071. SUN Peng, TENG Yun, LENG Ouyang, *et al.* Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6059–6071.
- [61] 杜丽佳, 靳小龙, 何伟, 等. 考虑电动汽车和虚拟储能系统优化调度的楼宇微网联络线功率平滑控制方法 [J]. *电力建设*, 2019, 40(8): 26–33. DU Lijia, JIN Xiaolong, HE Wei, *et al.* A tie-line power smoothing control method for an office building microgrid by scheduling thermal mass of the building and plug-in electric vehicles[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(8): 26–33.
- [62] 艾欣, 赵阅群, 周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1596–1603. AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1596–1603.
- [63] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于连续状态变量约束的微网虚拟储能系统最优平抑控制策略 [J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 55–63.



- CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, *et al.* Optimal smoothing control strategy of virtual energy storage system in microgrid based on continuous state constraints[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 55–63.
- [64] 屠聪为, 曹军, 于东立, 等. 基于空调负荷的虚拟储能参与调频的控制策略 [J]. *电力需求侧管理*, 2019, 21(1): 16–21.
- TU Congwei, CAO Jun, YU Dongli, *et al.* Control strategy of virtual energy storage system participating in frequency modulation based on air conditioning loads[J]. *Power Demand Side Management*, 2019, 21(1): 16–21.
- [65] ZHENG Y, HILL D, LIU T, *et al.* Supplementary frequency regulation with multiple virtual energy storage system aggregators[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2018, 46(16/17): 1719–1730.
- [66] 蔡志宏, 吴杰康, 王瑞东, 等. 考虑空调群虚拟储能的配电网电压无功协同控制研究 [J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(6): 63–68.
- CAI Zhihong, WU Jiekang, WANG Ruidong, *et al.* Coordinated control research for voltage and reactive power of distribution network considering virtual energy storage of air-conditionings[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(6): 63–68.
- [67] WANG Y, TANG Y, XU Y, *et al.* A distributed control scheme of thermostatically controlled loads for the building-microgrid community[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 350–360.
- [68] 林俐, 顾嘉, 王铃. 面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度弹性的电热联合优化调度 [J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3648–3661.
- LIN Li, GU Jia, WANG Qian. Optimal dispatching of combined heat-power system considering characteristics of thermal network and thermal comfort elasticity for wind power accommodation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3648–3661.
- [69] 杨丽君, 梁景志, 曹玉洁, 等. 基于热网储热特性的电-热系统联合经济调度 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 1–8.
- YANG Lijun, LIANG Jingzhi, CAO Yujie, *et al.* Joint economic dispatch of power and heating supply system considering energy storage characteristics[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(5): 1–8.
- 
- 作者简介:**  
苏娟 (1980—), 女, 博士, 副教授, 从事电力市场、综合能源系统优化运行、电力需求侧管理等研究, E-mail: [sujuan@cau.edu.cn](mailto:sujuan@cau.edu.cn);  
李拓 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事综合能源系统优化运行研究, E-mail: [18956175502@163.com](mailto:18956175502@163.com);  
夏越 (1988—), 男, 博士, 通信作者, 副教授, 从事电力系统建模与仿真、综合能源系统动态建模与仿真方面研究, E-mail: [xiayuexiayue@163.com](mailto:xiayuexiayue@163.com)。  
(责任编辑 张重实)

## Review and Prospect of Modeling Method and Application Scenarios of Virtual Energy Storage under Integrated Energy System

SU Juan, LI Tuo, LIU Junwei, XIA Yue, DU Songhuai

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to facilitate the complementary coupling of various forms of energy and achieve local consumption of renewable energy, integrated energy system (IES) has become a research hotspot across multiple disciplines. Considering the diversity and complexity of energy devices and networks, as well as the disparity in energy time scales, the source, grid and load with adjustable characteristics within the system are modeled as storage elements using energy balance principles, and a virtual energy storage system is constructed with them, which is incorporated into the optimization and scheduling of the IES. To accurately grasp the research focus of virtual energy storage, this paper firstly introduces the definition, logical structure and technical connotation of virtual energy storage, and summarizes four virtual energy storage modeling methods and characteristic indexes for the equipment or network on the source, grid and load side of integrated energy system, and then emphatically analyzes the specific application of virtual energy storage in four typical scenarios, and finally looks ahead to the future development direction of virtual energy storage. This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Research on Multi-time Scale Transient Modeling and Multi-rate Simulation Method of Electric/Thermal/Gas Multi-energy System Based on Frequency Shift Theory, No.52007194).

**Keywords:** integrated energy system; virtual energy storage; modeling method; application scenario