



能源互联网中的分布式储能

文 / 慈松

传统能源网络主要以化石能源为主，采用单向潮流树状拓扑结构，集中化管控，供能与用能垂直集成（包括目前的智能区域能源网络），不同能源系统之间条块分割。随着分布式能源的兴起和用户侧能源需求的快速增长，传统能源系统以不断增加化石能源消耗解决用能需求的方式已不具备可持续性，并且无法有效解决大规模分布式可再生能源的接入和新兴产业对能源供给的需求，如电动汽车和云计算等国家战略新兴产业。因此，如何从根本上变革能源结构和提高能源综合利用效率成为政府与产、学、研、用各界共同关注的热点问题。

近年来能源互联网思想异军突起，被视为解决前述问题的有力理论支撑。究其本质，能源互联网的兴起也是信息（数据）演变成为一种新型生产资料之后对能源领域里的各种生产要素进行重新配置和优化的必然结果。从技术上看，能源互联网作为一种新型能源系统，是支撑“互联网+智慧能源”得以实现的物理基础设施，同时它也是一种以用户用能体验为中心的定制化能源服务产业生态环境。能源互联网通过信息系统与传统能源系统紧密耦合的系统架构将传统垂直集成、条块分割的异构物理能源网络系统（例如电，热，气，油，核，交通等各自独立运行的能源网络）进行横向资源整合和产业拉动，实现通过信息轻资产增量盘活传统能源行业的重资产存量，支持多种能源的集成高效利用，从而产生新的价值。作为融入互联网边缘开放基因的能源互联网，其产生的动因首先是由用户侧日益多样的用能需求所驱动的，我们已经可以从分布式光伏，电动汽车，家庭储能等新型用户侧双向电源的普及不难得出这一结论。在能源互联网时代，传统用户的市场定位已经从原来简单的用能（consumer）变成动态产能用能（prosumer），这种角色的转变将对能源系统的演进和发展产生重大而深远的影响。从用户侧看，能源互联网要满足多样化用能需求驱动的能源生产和供给的C2B和C2C模式，因此能源互联网也被看做“工业4.0”在能源领域的具体实例，其主要产出是为各种用户需求提供灵活多样的定制化用能服务。

在能源互联网时代，传统能源网络边缘将存在海量双向能量节点，这将在技术和商业模

式上对垂直集成，单向潮流，边缘封闭的传统能源网络系统所支撑的B2C模式形成极大的挑战。特别是网络边缘出现大规模双向能量节点这一现象打破了传统能源网络系统的设计和管控边界条件，用户从consumer到prosumer的转变带来了更加复杂的随机性、突发性与不确定性，而且这些突发性和不确定性的随机叠加将会干扰到传统能源网络核心网架的运行稳定和安全，引发分布式能源系统和传统能源系统在网络管控层面的对立和矛盾，从而影响整个新能源产业的发展。

从系统理论的角度看，传统能源系统是一个紧耦合的单向模拟系统，是一个无记忆的简单应激系统，而能源互联网则是一个松耦合的双向数字系统，是一个智能的信息物理系统。因此，从传统能源系统向能源互联网的演进需要在传统能源系统中加入大量的分布式存储（记忆）能力来支撑能源虚拟化和数字化处理，优化能源系统的全局效率和稳定性，所以分布式储能是能源互联网快速发展的核心技术之一。从技术实现手段上看，目前分布式储能有电池储能，相变储能，蓄冷蓄热储能，飞轮储能，抽水储能，超级电容储能及压缩空气储能等众多方式。其中，电池储能方式在千瓦时级至兆瓦时级储能有着其它储能方式不可比拟的优势，因此在本文中我们将以目前应用最广的电池储能为例来具体说明分布式储能系统发展的问题和对策。

分布式电池储能系统是实现发电曲线与用电曲线间动态匹配的核心设备，具有平抑波动、匹配供需，削峰填谷，提高供电质量，提升灾备能力，延缓电网升级改造等功能，是在分布

式能源系统中是必不可少的装置。在分布式电池储能中，锂离子电池储能方式具有效应速度快，能量转换效率高，成本下降快和可扩展性好等优点而被列为首选。因此，锂电池储能是最具市场应用前景的储能方式之一。然而由于生产工艺、安全性、可靠性、易用性等问题，锂电池单体容量无法满足负载对于储能容量的需求，所以电池成组使用的方式是必然的。在电池成组技术上，小容量单体成组或成网在储能系统的安全性，可靠性和可管性方面有着大容量单体不可比拟的优势，这一观点已被众多应用实践证明，例如，特斯拉 Model S 电动汽车采用了 8000 多节 18650(即直径 18 毫米，高 65 毫米的圆柱形电池)小容量单体电池。然而，通过大量电池单体成组构成的储能系统在效率、运维成本、安全性和可靠性等方面存在的问题是目前世界上公认的技术难题，其科学问题是电池单体间存在无法避免的差异性与电池成组技术采用的固定串并联的刚性系统架构之间的不匹配，从而引起电池组的“短板效应”。此外，电池本身是一个电化学反应过程，其工作过程表现出非常强烈的非线性特征，因

此电池荷电状态 SOC(state of charge)难以做到准确的测量和估算，这进一步加大了电池系统管控的难度。由于传统电池管理系统(BMS)是叠加在固定连接电池组之上的信息测量系统，无法彻底解决目前大规模电池组存在的单体均衡、效率、可维护性、使用寿命、梯次利用、可靠性与安全性等问题。因此，我们需要从能源互联网中能量流和信息流紧密耦合的角度重新看待分布式电池储能系统的技术路线，引入基于能源虚拟化与能量信息化的分布式能量管控的新思想，实现“电池与管控系统分离，电池系统与应用系统分离”，把电池能量虚拟化为可计算可计量的互联网资源，有力支撑能源互联网中分布式储能的发展。

此外，能源互联网中分布式储能系统是分布式能源接入传统能源系统的必要设备，所以分布式储能系统的功能和性能定义应与分布式能源接入需求匹配，正如信息领域中信息存储系统的多样性对应于信息处理的不同要求。如图所示，类似于信息存储架构从最上层的寄存器到最下层的互联网存储，自上而下的单位存储成本是逐步递减的，但存储系统的响应速度和延迟中断性能却不断增大，能源互联网储能系统架构具有同样的特征。能源互联网中能量存储系统的构建需要应对各种分布式电源无序随机接入传统电网的要求，我们需要引入软件定义能量管控系统，做到不同种类的能量存储系统搭配使用，以达到降低单位成本，优化系统性能的目的。

例如用户侧能源互联网中，为了应对区域内新型分布式能源发电的波动性问题及新型负荷接入的随机性问题，如电动汽车充电负载，我们只需要应用超级电容和功率型锂离子电池

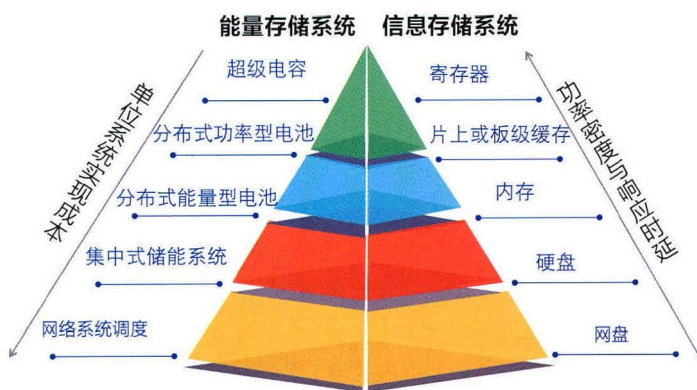


图1 信息系统存储架构与能源互联网能量存储架构的对照逻辑关系

来平滑小容量的净负荷高频波动，保证负荷曲线趋近于常规能源系统的负荷曲线形状，然后应用成熟的能源调度策略实现满足能源应用的安全性、可靠性和经济性。值得注意的是在上述场景中，我们并不需要采用大容量集中式储能系统，只需采用小容量高功率密度的能量缓存系统即可以有效解决分布式能源的接入问题，同时也可以有效地保证能源网络规划方案的投资效益和保全现有固定资产的使用效率。

此外，通过构建储能云平台，基于能量信息化技术的分布式储能系统可以进一步通过互联网技术和信息物理系统（CPS）技术进行迭代组合与管控，并可以按需灵活扩展以满足不同应用场景的需求，如数据中心 UPS 储能，电动车储能、建筑和家庭储能、可再生能源电厂储能以及社区储能等。在能源互联网中，能量流与信息流的紧密耦合可以让我们基于能量信息化与网络化管控将数量巨大而利用率极低的存量碎片化储能电池资源盘活利用，而不是重新营建全新的分布式储能系统。例如，我国已部署移动通信基站数量已超过数百万个，单站平均配备 1000Ah 的备用电池能力，平均每年使用次数小于 10 次，并且每 5 年需要更换，造成了巨大电池资源浪费和运维成本。通过采用能量信息化和互联网化的分布式能量管控与协同，我们可以根据峰谷电价的波动与用电负载变化，使这些碎片化的储能电池在峰电价时放电，谷电价时储电，达到削峰填谷，

提高资产利用率，降低移动通信网络用电成本的目的。又例如，在电动汽车发展中，缺少充电基础设施与电动汽车电池成本过高这两点是制约我国电动汽车产业发展与推广应用的重要瓶颈。通过能量信息化与网络化管控，可以通过“车电分离，电池自选，自主换电，能量运营”的模式盘活目前电动汽车的闲置电池资源，打通动力锂离子电池梯次利用的产业链和价值链，降低用户购买与使用电动汽车的成本，实现电池资产面向需求的细粒度复用，创造出新的价值。

总而言之，分布式储能系统是实现能源互联网的必要技术手段。尽管分布式储能系统的物理形态多种多样，但是通过能源虚拟化与能量信息化技术，我们可以屏蔽不同分布式储能系统的物理形态差异性，将其中的能量进行归一化和数字化管控，使能量变成一种可计量可以计算的网络资源，进而通过信息互联网实现分布式储能系统的网络化管控。作为能源互联网中海量分布式电源接入电网的必要设备，小容量高功率密度的分布式能量缓存系统可以将分布式电源带来的高频冲击负载拦截在网络边缘，使分布式能源的发展不依赖于电网侧的升级改造，具有重大的现实意义。由于分布式储能系统通常贴近负荷，我们可以通过信息轻资产盘活用户侧大量闲置的储能电池资源，贯彻电池产业链与价值链，创造出新的价值。■

作者单位：清华大学