

# 能源互联网背景下的电力储能技术展望

李建林, 田立亭, 来小康

(中国电力科学研究院, 北京市 100192)

**摘要:** 基于能源互联网的特征, 给出了广义电力储能的定义, 提出了储能在能源互联网中的 2 种应用模式。对电化学储能、电动汽车、储热、储氢等将在能源互联网中发挥重要作用的储能技术现状进行了分析, 并对储能在能源互联网中的关键应用技术进行了探讨。指出了新能源发电和储能的协调规划和调度技术、基于储能的能源路径和能源分配策略、储能与能量转换装置的集成设计和协调配置、考虑储能的能源交易机制是储能在能源互联网应用中的几项关键技术。

**关键词:** 储能; 智能电网; 能源互联网; 能源互联; 能源集线器; 可再生能源发电; 多能源耦合

## 0 引言

为应对化石能源开发利用带来的能源和环境危机, 以电为中心、以新能源大规模开发利用为特征的新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。在此次能源变革的推进下, 能源互联网概念应运而生。

目前, 关于能源互联网的范畴、架构和形式有多种理解<sup>[1-5]</sup>, 尚未形成一个公认的定义。其中文献[3]通过智能电网与能源互联网内涵的对比, 将能源互联网定义为以电力系统为核心, 以互联网及其他前沿信息技术为基础, 以可再生能源为主要一次能源, 与天然气网络、交通网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂多网流系统。实际上, 电力系统是一个天然的能源互联网, 其将化石能源、核能、水、风、太阳能、地热等一次能源转化为清洁便利的电能。与智能电网相比, 能源互联网的主要特征体现为: ①多种能源紧密结合, 即电能与其他能源以一定耦合形式形成互补关系, 共同构成能源供应体系; ②分布式管理机制, 以能源路由器<sup>[2]</sup>为核心部件实现一定区域内的能量和信息管理; ③多元主体间的交互, 能源互联网中存在多个交易主体, 多种交易模式并存, 能源服务无处不在<sup>[6]</sup>。在友好互动、清洁高效、安全自愈、以信息通信技术为基础等方面, 能源互联网与智能电网的特征<sup>[7]</sup>是相同的, 因此, 能源互联网也被称为智能电网 V2.0<sup>[8]</sup>。

能源互联网中, 一次能源以可再生能源为主, 终

端能源消费体现为以电能为主的多种能源形式。通过电能、热能、化学能等多种能源的相互转换和互补, 实现电网、气网、热力网、交通网等能源网络的紧密结合。先进储能技术、电力电子技术、新能源发电技术、智能能量管理技术、智能故障管理技术、可靠安全通信技术和系统规划分析技术等被认为是能源互联网的关键技术<sup>[6-9]</sup>。在能源互联网中, 多种能源形式以最清洁高效便捷的方式进行转换、传输、存储并在用户端得到共享, 储能将成为电能与其他能源灵活转换和综合利用的关键设备。储能破解了能源生产和消费的不同步性, 使能源在时间和空间上具有可平移性, 实现了能源共享的前提。

智能电网中, 储能已成为大规模集中式和分布式新能源发电接入和利用的重要支撑技术<sup>[10-13]</sup>。在能源互联网发展背景下, 储能的作用和地位将发生显著变化。基于储能在电力系统中的应用基础, 储能的功能将进一步得到拓展, 一些储能技术将获得新的发展机遇。目前, 对储能在能源互联网中的应用方式和功能地位尚未有清晰的认识。文献[14]指出分布式储能是解决能源互联网中能量源的不确定性与能量流无秩序性的支撑技术。文献[15]设想在全球可再生能源发电基地、输电网络和负荷中心配置储能的方案。现有工作大多未能突破储能在智能电网中的应用范畴, 储能在能源互联网中的应用研究和示范缺乏指导。

本文基于能源互联网的特征, 分析了储能的作用和地位, 对未来能源互联网中将发挥重要作用的储能技术进行介绍, 并对储能在能源互联网中的关键应用技术进行了探讨。

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2015-10-13。

国家电网公司基础前瞻项目(DG71-15-038); 中国电力科学研究院创新基金资助项目(DG83-15-003)。

## 1 能源互联网背景下的广义电力储能技术定义

传统意义的电力储能可定义为实现电力存储和双向转换的技术,包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、超导磁储能、电池储能等<sup>[16]</sup>,利用这些储能技术,电能以机械能、电磁场、化学能等形式存储下来,并适时反馈回电力网络。能源互联网中的电力储能不仅包含实现电能双向转换的设备,还应包含电能与其他能量形式的单向存储与转换设备。在能源互联网背景下,广义的电力储能技术可定义为实现电力与热能、化学能、机械能等能量之间的单向或双向存储设备。如图1所示,电化学储能、储热、氢储能、电动汽车等储能技术围绕电力供应,实现了电网、交通网、天然气管网、供热供冷网的“互联”。其中,电化学储能和电动汽车实现了电力双向转换,用双框线标出,其余用单框线标出,图中箭头的方向表示能量流动的方向,FCEV表示燃料电池电动汽车,BEV表示电化学电池电动汽车。

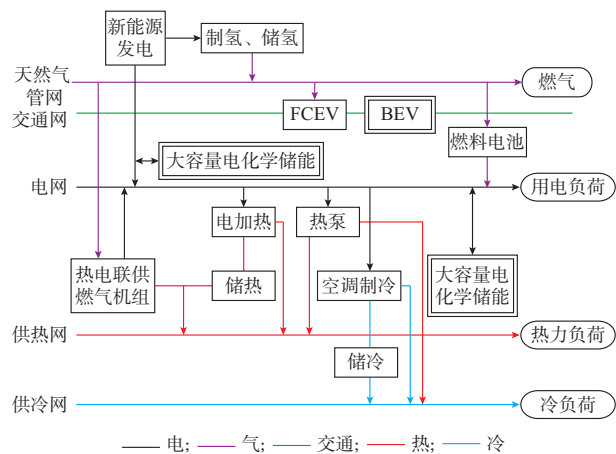


图1 能源互联网中的电力储能技术  
Fig.1 Electrical energy storage technologies in the energy internet

图1中,除储能设备外,还包含了热电联供机组、燃料电池、热泵、制氢等能源转换设备。储能和能源转换设备共同建立了多能源网络的耦合关系。在实际应用中,二者常进行一体化设计,难以区分,因此本文将具有储能能力的电力转换设备也纳入广义电力储能的范畴。图1中,通过新能源发电实现风、光、潮汐、地热等主要一次能源向电能的转换。在电网传输和消纳能力的限制下,部分新能源发电将通过制氢、制热等方式进行转换,部分新能源发电以电化学储能等双向电力储能设备存储并适时返回电网。在各电力储能技术的支撑下,新能源发电与热电联供机组、燃料电池、热泵等转换设备协调运行,实现了新能源高效利用目标下,以电能为核心的

多能源生产和消费的匹配。

## 2 能源互联网中储能的应用模式

储能技术已被视为电力系统“发—输—变—配—用”环节中的重要组成部分<sup>[16]</sup>。美国Sandia国家实验室将储能为电力系统提供的服务划分为5类18项<sup>[17]</sup>。在能源互联网中,储能的作用将进一步得到扩展。图2描绘了能源互联网的概念架构,包括物理系统、管理系统和能源交易市场。在能源互联网物理系统中,以实现大规模新能源发电远距离、跨区域输送的大电网为核心,结合天然气输送通道构成了能源互联的广域骨干网络;在能源骨干网络的基础上,按照一定区域对能源生产和消费进行划分,形成若干个能源局域网<sup>[2]</sup>。如图2所示能源局域网通过本地能量接口(local energy interface, LEI)接入骨干能源传输网,负荷、能源转换和储能设备通过各自的智能能量接口(intelligent energy interface, IEI)并网。能源互联网的管理系统可划分为广域能量管理系统和局域能量管理系统两大层级,广域能量管理系统实现大规模能源生产和输送的协调调度,局域能量管理系统对本地的能源生产和消费进行优化。大规模集中式能源生产商、大容量储能运营商以及局域能源网运营商共同参与能源交易市场。类似虚拟电厂(VPP),对分布式能源生产进行聚合管理,可形成虚拟能源站(virtual energy plant, VEP),作为补充形式参与系统能量管理和能源市场交易。

在能源互联网架构的基础上,可以看出储能能在能源互联网中存在如下两种应用模式。

1)广域能源网应用。在骨干网络中,利用大规模储能技术协调集中式能源生产,参与广域能量管理,为大规模能源生产和传输提供“能量缓冲”,为系统广域能量调度提供支撑,维持系统供需平衡。大容量储能的运营主体直接参与能源交易市场,根据能源市场价格变动灵活购入或卖出能量,或提供调节服务。

2)局域能源网应用。局域能源网中,储能与能源转换装置相互配合共同维持系统经济高效运行,局域能源网管理系统根据储能的状态及供需预测信息,结合能源价格信息,对局域网内能源的生产和消耗进行决策,从能源市场购买或卖出能量。在VEP应用中,由于难以对各分散生产者的行为进行预测,因此对分布式电源、电动汽车等进行聚合管理具有较大的难度,引入储能对VEP的管理和运行有着重要意义。在储能的作用下,分散的能源生产者具有更可信的能源供应能力,使其具备参与能源市场交易的条件。

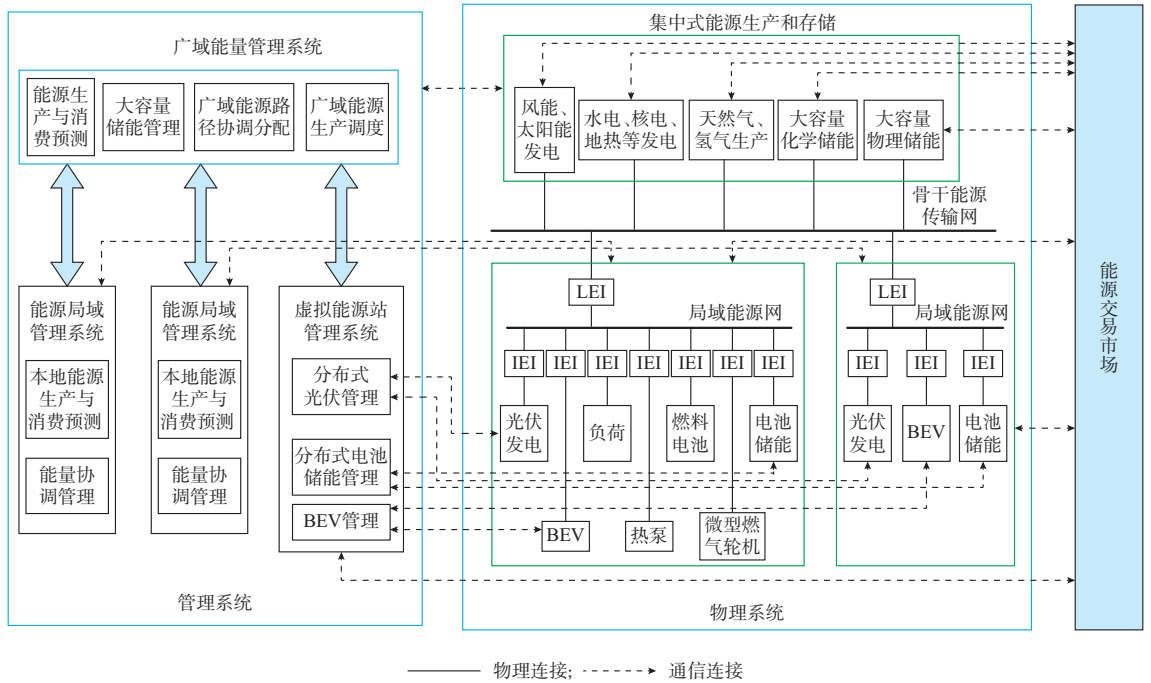


图2 能源互联网的概念架构  
Fig.2 Conceptual structure of energy internet

### 3 能源互联网中储能的作用和需求

可见,储能为广域和局域能源互联网提供了必要的支撑。在各应用模式下,储能具有特定的作用和应用目标,对储能技术的需求也有所差异。此处,将储能能源互联网中的作用和需求归纳如下。

#### 3.1 支撑高比例可再生能源发电电网的运行

能源互联网以可再生能源为主要一次能源,利用可再生能源发电、供热、制氢均是能源互联网中可再生能源利用的重要形式。

全球范围内,可再生能源发电目前处于快速增长阶段。大规模波动性及间歇性可再生能源发电的接入使得电源侧的不确定性增加,加大了电网功率不平衡造成的风险。针对大规模可再生能源发电的接入,一方面通过储能技术与可再生能源发电的联合,减少其随机性并提高其可调度性;另一方面通过电网级的储能应用增强电网对可再生能源发电的适应性<sup>[10]</sup>。对于后者,储能作为电网的可调度资源,具有更大的应用价值和空间。在电网级的应用中,对储能的需求大体可以分为功率服务和能量服务两类<sup>[18]</sup>。功率服务中储能应对电网的暂态稳定和短时功率平衡需求,作用时间从数秒至数分钟。能量服务中,储能用于长时间尺度的功率调节,作用时间可从数小时延伸至季节时间尺度,用于应对系统峰谷调节以及输配电线路的阻塞问题。

对于功率服务,需要响应快速的大容量储能技

术,如飞轮储能、超级电容储能、电池储能等,这些储能技术与电力电子技术相结合,具有四象限调节能力,可对有功功率和无功功率进行双向调节,对电网的电压和频率进行支撑。对于能量服务,双向的电力储能需要具有长时间尺度的存储能力、较高的循环效率及较低的成本,实现可再生能源发电在时间维度上的转移。实际上,大规模电力储能并不是解决高比例可再生能源发电利用问题的唯一手段,用电负荷的柔性调节能力也是缓解电网压力的有效方式,在负荷侧,分布式的电池储能、电动汽车、蓄热、蓄冷等分布式储能技术的应用也大大提高了电力负荷的柔性调节能力。

对于高比例新能源发电电网,为提高综合能源利用效率,储氢、储热等单向的大规模储能技术,为冗余的新能源发电提供了向其他能源形式转移的途径,同时在长时间尺度,为广域能源互联网的运行提供支持。

#### 3.2 提高多元能源系统的灵活性和可靠性

能源互联网中存在多种能量流的相互耦合和影响。以社区热电联供系统为例,图3所示的多端口网络中电力、热力服务之间存在相互约束关系,按照能源集线器建模方法<sup>[19-20]</sup>,可将k时刻能源供应的耦合关系表述为:

$$\begin{bmatrix} L_c(k) \\ L_h(k) \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} P_c(k) \\ P_h(k) \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} S_c^{hs}(k) \\ S_h^{hs}(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$



式中： $\mathbf{C}$ 为集线器中能源转换元件的功率耦合矩阵，包括电力变压器、热电联供燃气轮机(CHP)、电锅炉； $\mathbf{D}$ 为系统中储能元件的功率耦合矩阵； $\mathbf{L}=[L_e \quad L_h]^T$ 为系统的输出功率向量； $\mathbf{P}=[P_e \quad P_h]^T$ 为系统的输入功率向量； $\mathbf{S}=[S_e^{bs} \quad S_h^{bs}]^T$ 为储能功率向量。

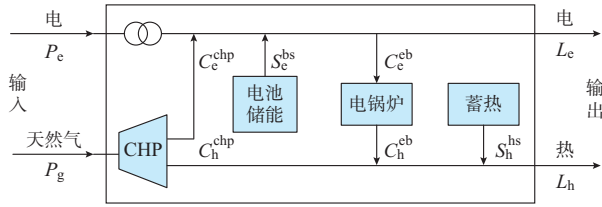


图3 热电联供系统能源集线器  
Fig.3 Energy hub for a heat-electric combined service system

若系统中不存在储能，则有 $\mathbf{L}=\mathbf{C}\mathbf{P}$ ，燃气轮机将按照以热定电、以电定热或混合运行3种模式工作<sup>[21]</sup>。考虑储能作用时，CHP可更加灵活地制定生产计划。一定条件下，系统还可利用储能实现电力和热力供应的解耦。当CHP检修或故障时，系统仍能维持一定输出，有效提高了系统的可靠性。

在支撑多能源系统的灵活性和可靠性方面，需要储能弱化多种能源间的强相关和紧密耦合关系，储能的技术类型和作用时间尺度要与系统的能源供应需求和转化元件的技术特性相匹配。

### 3.3 为多元能源系统能量管理和路径优化提供支持

对于局域多元能源系统，管理者可根据价格信息合理安排各能源的生产、转换、存储及消费，使得系统运行成本最低，并保证系统可靠和高效运行。储能和释能管理是系统运行决策的重要对象。如图3所示的多能源系统，除式(1)表示的功率耦合关系外，还应考虑储能的状态变化，即

$$\mathbf{E}(k+1)=\mathbf{E}(k)+\boldsymbol{\eta}\mathbf{S}(k) \quad (2)$$

式中： $\mathbf{E}(k)$ 为 $k$ 时刻储能装置的能量存储状态向量； $\boldsymbol{\eta}$ 为与储/释能效率相关的向量。

系统可依据储能状态的动态变化，确定储能的功率方向和大小，维持系统内供需平衡。同时，系统中各转换元件的功率分配即系统潮流的分布将影响系统运行经济性和效率。储能的功率流向和大小是系统潮流优化的重要控制变量，可使系统获得最优的能量流路径。另外，根据能量在储能单元的滞留，还可判断系统中能量流堵塞情况，及时调整运行计划。储能的安装位置、容量大小和储能释能过程的优化对局域能源系统的经济高效运行起到重要作用。要求储能具有动态响应系统运行状态的能力、

较高的转换效率以及便利的安装条件。

### 3.4 提高能源交易的自由度

在能源互联网中，传统的能源交易模式将发生变革，能源的生产者和消费者都将参与到市场竞争中，且生产者和消费者作为交易主体，其角色可相互转换。理想的能源交易市场不仅可促进能源在局部区域的优化分配，也可在广域范围内提升资源配置的效率，使电能和其他能源自发形成合理高效的分配格局。对于大型的能源供应商，利用大规模储能的存在改变了用户与能源供应商之间固有的供需关系，使用户具有自由选择参与或退出市场的权利。外部能源供给成本越高，用户便更具有“脱网”的趋势；反之，用户更有“并网”的倾向。储能的存在还提供了用户参与能源交易的可能性，用户根据自身的能源消耗需求和生产能力，结合储能的配置，向能源市场发出定制的能源需求，在一些时段，将以生产者的角色向市场提供可靠的能源供给。在一定的市场机制下，储能的经济性对能源互联网的构件起到关键性的作用。

## 4 能源互联网中储能技术现状

能源互联网中存在大规模可再生能源发电送出和消纳、局域多能源系统灵活高效和经济运行、能源市场自由交易等应用需求，为储能技术提供了发展机遇。此处对契合能源互联网发展需求的几种电力储能技术现状进行介绍，包括储热、氢储能、电动汽车和电化学储能。其中一些储能技术可实现大规模的能量存储，在广域能源的调配中发挥重要作用，一些储能技术灵活高效并与用户需求紧密结合，是局域多能源系统中的必要元件。

### 4.1 储热

储热技术大体可分为显热储能、潜热储能和化学储热3类。显热储能通过提高介质的温度实现热存储。潜热储能，即相变储能，利用材料相变时吸收或放出热量，目前以固-液相变为主<sup>[22-23]</sup>。与显热储能相比，相变储能具有较稳定的温度以及较大的能量密度。化学储热利用可逆化学反应储存热能，可实现宽温域梯级储热，能量密度可达显热和潜热储能的10倍以上<sup>[24-25]</sup>。化学储热技术要求储热介质具备可逆的化学反应，储热材料选择难度大。目前储热技术仍以显热和潜热储能为主。

在太阳能热发电中，储热技术用于解决太阳能发电的间歇性，使太阳能发电在24h具有较稳定的输出。2008年，西班牙Andasol槽式太阳能热发电

站投运,其首次采用熔融盐进行蓄热,在太阳辐照度较低时,熔融盐释放的热量可支持涡轮机满功率运行7 h。目前,美国、西班牙、意大利等国家已经有多个熔融盐蓄热的光热发电站投入商业化运行。熔融盐蓄热属于显热储能,用于太阳能热发电的相变储能材料处于研发和试验阶段。

大规模储热技术在应对新能源发电的消纳问题中可起到重要的作用。冬季供热期间,为满足供热负荷,热电机组的调峰深度受限,在新能源比例较高的地区,产生严重的弃风/光现象。为热电机组配置储热装置(一般为储热水罐),一定程度上可解耦机组的热功率和电功率,提高热电机组运行灵活性和调峰能力。如丹麦 Avedøre 电站安装有2台储热水罐,容积达44 000 m<sup>3</sup>,放热能力达330 MJ/s。在风电出力较大的时段,降低电站发电功率,并利用储热罐维持热力供应。通过电锅炉进行供热也是促进风电消纳的手段之一<sup>[26]</sup>。大功率蓄热式电锅炉可采用水、蒸汽、固体或者相变材料进行储热,单台蓄热容量可达数十兆瓦时。2011年投运的吉林大唐洮南风电供热项目是中国首个风电供热项目。2015年6月,国家能源局发布了《关于开展风电清洁供暖工作的通知》,大力推广风电供热技术。

在用户侧,利用低谷电力蓄冷降低生产和生活中冷量供应成本已成为需求响应的一项重要体现。其中蓄冷技术采用的介质包括水、冰、优态盐等。冰蓄冷利用水-冰相变来存储释放冷量,能量密度达335 kJ/kg,为水蓄冷的7~8倍<sup>[27]</sup>。冰蓄冷技术已十分成熟,得到了广泛的应用。建设大型的制冷站及冷媒传输网向一定区域提供冷源是该项技术的发展趋势。区域供冷技术的推广对电网峰谷负荷调节有着重要的意义。

相较于储热,在相同温度变化下,储冷可更有效地存储高品位能量<sup>[28]</sup>。当前,深冷储电技术逐渐得到关注,其利用常压低温液态空气进行储能。2011年,世界首套深冷液态空气储能示范工程投运,验证了深冷储电技术的可行性,考虑余热吸收后效率达50%。不同于深冷储电,热泵储电具有较高的理论效率,其通过近似绝热的过程压缩和膨胀气体,同时产生高温热能和低温冷能,以此达到高效储存电能的目的,反向时用压缩的高温气体驱动电机发电。热泵储电技术结构复杂,对热功转换设备要求高,仅处于小规模示范阶段<sup>[29]</sup>。

## 4.2 氢储能

氢能利用涉及制氢、储氢、输氢、用氢4个环节。天然气制氢、煤制氢是目前氢气工业生产的主要方式。近年来国内外开展了利用新能源发电电解水制

氢的小规模示范项目。电解水属于高耗能制氢方法,每立方米氢气的耗电量约为4.5~5.5 kW·h,利用电网负荷低谷时期的新能源发电制氢,是提高新能源发电利用率的方式之一。现有的碱性电解槽和固体聚合物电解水制氢技术对风电的波动性有良好的适应能力<sup>[30]</sup>。用光催化直接裂解水是一种理想的利用新能源制氢方法,其关键在于半导体光催化剂材料的突破<sup>[31]</sup>,该项技术仍处于研究阶段,光能捕获效率和制氢速率尚不能满足商业化需求。

标准状态下的氢气能量密度仅为8.4 MJ/L,一般采用高压或低温液化方式存储,存在能耗大、安全性差等问题。固态材料储氢是最具前景的储氢技术,可分为物理吸附储氢和化学氢化物储氢两类。目前的固体储氢材料在储氢容量、热力学和动力学性能、可逆性等方面有待提高<sup>[32]</sup>。

利用现有的天然气管网,将新能源制氢混入天然气管道,是实现氢能输送的经济方法。氢气和甲烷在能量密度、热值、渗透率等方面具有显著差异,氢气的混入对现有天然气管线设施带来不利的影响。关于氢气对管线的腐蚀并没有统一的结论,文献<sup>[33]</sup>指出当氢气含量(体积分数)低于17%时,不会对现有管线和终端设施产生太大影响。为氢气敷设专用管道是大规模氢能利用的有效保障,2014年4月,美国从休斯敦到新奥尔良长达600英里的输氢管道宣布竣工。

燃料电池利用电化学反应将氢能转换为电能。质子交换膜燃料电池(PEMFC)是当前燃料电池研究的重点,适用于车载发电系统和小型分布式电源系统。根据美国能源局的技术路线<sup>[34]</sup>,到2020年,车用燃料电池系统的目标成本为40美元/kW,使用寿命为5 000 h(约15万英里),当前成本约为50美元/kW,使用寿命约为2 500 h。微型热电联产也是PEMFC应用的重要市场之一,在该应用场景下,由于不需要频繁启停,PEMFC的寿命小时数可大大延长。对于电站级应用,磷酸燃料电池(PAFC)可作为数百千瓦级电源使用;高温燃料电池,包括固态氧化物燃料电池(SOFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)<sup>[35]</sup>可实现兆瓦级氢能发电,目前全球已有多个兆瓦级燃料电池电站投产。

## 4.3 电动汽车

按照动力来源,纯电动汽车可分为FCEV和BEV。前者将氢能与交通运输网联系在一起,后者将促成电网与交通运输的紧密耦合关系。当前BEV已进入商业化阶段,FCEV也进入商业化准备阶段。规模化BEV的有序充电和馈入电网(vehicle to grid, V2G)对改善电网运行特性有着积极的作

用。通过实时或分时电价对 BEV 的充(放)电行为进行引导是实现大规模电动汽车与电网互动的有效方式,可实现配电网阻塞管理、平移负荷峰谷<sup>[36-37]</sup>等,减少电动汽车充电对电网造成的压力。

据统计,私人乘用车 90% 以上时间处于停驶状态,可以预见规模化的 BEV 接入电网后构成了可观的储能资源。利用电动汽车储能参与电网调度管理,并与新能源发电进行协调配合,是规模化电动汽车的应用前景之一。文献[38]提出利用规模化电动汽车的聚合参与电网二次频率调节。文献[39]提出了区域电网电动汽车-风电协同调度的概念,分析了利用电动汽车消纳风电的可行性。文献[40]研究了含电动汽车和风电机组虚拟发电厂的竞价策略。但电动汽车的分散性和随机性使其电网级的应用变得困难,同时还受到充电设施分布、用户充电需求、动力电池容量等条件的约束。规模化电动汽车储能能力的利用为电网的监测、管理和控制能力带来了挑战<sup>[41]</sup>。丹麦的“Edison”项目是目前为数不多的利用 BEV 储能进行电网级应用的示范项目之一。该项目开发了电动汽车的聚合管理软件、终端控制软件、智能充电设施等,建立了电动汽车与电网互动的演示系统。除分散的电动汽车用户外,集团车队也是电动汽车储能能力的重要体现,中国在青岛薛家岛建成了世界上规模最大的公交车队充换电站,可为 280 辆公交车提供充换电服务,最大充放电功率达 4 320 kW。

电动汽车作为分布式的储能单元,其在家庭能量管理、与分布式电源的协调方面也可发挥重要作用。在电动汽车市场推广过程中,其在智能家居、微电网等场合中与其他负荷及电源的协调配合是当前电动汽车在电网中的主要应用模式。

#### 4.4 电化学储能

电化学储能安装灵活、响应速度快,在为电网提供功率服务和能量服务中都可起到重要作用。其在抑制新能源发电快速波动、电网调频、微电网能量管理和稳定性支撑、分布式电源接入等方面具有显著的技术优势。当前,电化学储能在电力系统中的应用处于快速增长中。截至 2014 年底,全球电力储能的累计装机总量(2000—2014 年)达 845.3 MW(不包含抽蓄、压缩空气、储热),其中钠硫电池由于前期优势占比为 40%,锂离子电池呈快速增长状态,占比为 35%<sup>[42]</sup>。目前,中国已开展多项兆瓦级的锂离子电池、液流电池、铅酸电池、超级电容等电化学储能技术的示范应用。如国家风光储输一期工程安装了 14 MW/63 MW·h 磷酸铁锂电池、2 MW/

8 MW·h 的钒液流电池储能装置以及 2 MW/12 MW·h 的胶体铅酸电池,用于提高风光发电的可调性。深圳市宝清储能电站利用 4 MW/16 MW·h 的锂离子电池实现了配电网的多种应用功能。在离网或弱电网连接地区,为了利用风能和太阳能提供稳定可靠的电力供应,电池储能得到了广泛的应用,如浙江东福山岛风光储微电网工程,该工程利用 100 kW 光伏、210 kW 风力发电,以及 300 kW 铅酸电池储能替代原有的柴油发电机实现岛内的电能供给。在德国、澳大利亚等国家,户用光伏发电得到了推广,由于光伏上网电价和补贴的不断削减以及用电税费的增加,使得户用电池储能具备了一定的经济性。

目前,国内外大多数电化学储能项目集中在新能源场站、配电网、微电网领域,少有大规模的电网级应用。电网级应用往往需要数十兆瓦以上的容量。此时,电化学储能面临抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等大规模储能技术的竞争。2013 年,美国电力公司(AES)将安装于 Tait 发电厂的 20 MW 锂离子电池储能系统接入电网,并与 PJM 电力市场签署独立的协议,为系统提供快速调频服务,维持电网稳定。电化学储能的经济性是制约其实现大规模应用的主要因素。根据电网对储能的规模化应用需求,美国能源局提出了电化学储能的远期(2023 年)目标<sup>[43]</sup>:循环寿命 $\geq 5\ 000$  次,循环效率 $\geq 80\%$ ,平准化电力成本(LCOE) $\leq 0.1$  美元/ $((\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{次})$ ,系统单位价格 $\leq 150$  美元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。锂离子电池、铅酸电池、钠硫电池等电池储能的技术经济指标现状如图 4 所示。为了进一步提高电化学储能的技术经济指标,以及满足安全性、可靠性等方面的要求,新型电池储能技术包括全固态锂离子电池、半固态电池、锂硫电池、液态金属电池、钠离子电池等正处于研发阶段,可以期待未来电化学储能技术的突破。

除上述储能技术外,传统抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、超导储能等也是能源互联网中重要的储能形式,由于安装条件、转换效率等方面的限制,其面临电化学储能等快速发展技术的竞争。应对能源互联网应用需求,上述储能技术也在不断发展进步中,如发展先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)适应风力发电的波动性<sup>[44]</sup>,开发具有压缩空气储能的冷热电三联供系统以提高压缩空气储能的综合效率<sup>[45]</sup>,应用模块化飞轮储能单元形成阵列以提高系统的灵活性<sup>[46]</sup>等,此处不作详细论述。



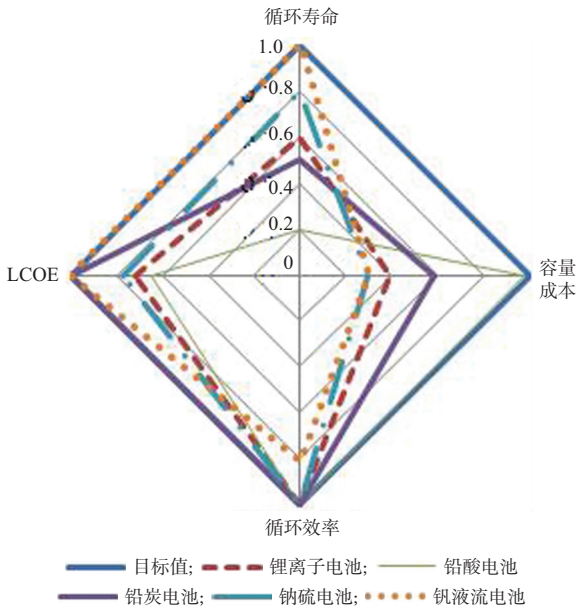


图4 电池储能技术经济指标现状与目标值对比  
Fig.4 Technical and economic targets versus current status of battery energy storage

## 5 能源互联网中储能应用关键技术分析

储能技术不仅建立了多种能源之间的耦合关系,更为能源互联网互动、开放、优化共享的机制和目标提供了必要的支撑。储能将是能源互联网构建中不可缺少的组成部分,在能源互联网中发挥能量中转、匹配和优化的重要作用。当前阶段储能可在可再生能源发电场站、配电网、微电网、智能家居等智能电网场景中的示范为储能在能源互联网中的应用奠定了基础。能源互联网对储能的应用提出了新需求,除储能本体研发外,还需要在储能的规划、设计、控制调度等应用关键技术开展深入研究。

### 5.1 大容量储能的规划及与可再生能源发电的协同调度技术

实现大规模可再生能源的高效利用是能源互联网建设的核心目的。电网对集中式可再生能源发电的送出和消纳涉及系统充裕度、安全性和经济性等方面的问题。如何利用储能应对上述问题,实现高比例新能源发电的高效利用是当前关注的热点。大规模化储能与可再生能源发电的协同规划与调度是实现电网级储能应用的两个关键问题。其中,储能的规划包括储能的选址、选型和容量配置几个层次的内容;储能的调度,涉及包含储能、新能源、常规电源、可控负荷在内的机组组合问题<sup>[47-48]</sup>。在规划层面,通过储能的合理选型、布局和容量配置,实现发电输电资源的协调配合和高效利用;在调度层面合理

安排储能系统的调峰调频和旋转备用容量,实现新能源本地和跨区域消纳。实际上,储能的规划与调度问题很难分解开,一些文献将其描述为两层优化问题<sup>[49-50]</sup>,外层为电网潮流约束下的储能选址和容量配置优化,内层为以新能源送出消纳或经济性为目标的储能充放电运行优化。关于储能的规划和调度方法研究仍处于起步阶段,新能源发电不确定性的建模、储能成本模型、系统风险的评估以及优化问题的求解是该项工作的主要难点。以上只考虑了利用双向的电能存储技术实现电力供应平衡。在新能源发电供热、制氢,规模化电动汽车柔性充放电等条件下,电力系统与其他能源系统紧密耦合在一起,围绕新能源发电高效利用问题,考虑大容量储热、储氢、电动汽车的电-热-气-交通联合系统的规划和优化控制方法研究目前基本处于空白阶段<sup>[51]</sup>。

分布式储能在配电网及用户侧的应用也是支撑可再生能源发电利用的关键技术<sup>[52]</sup>,现有多数工作从本地应用角度出发,如何从系统角度评估储能的效益,对储能进行合理的规划和管理是分布式储能应用的关键,利用VPP技术对分布式储能进行广域协调控制是该问题的难点之一。

### 5.2 基于储能的能量流优化和能量调度技术

在多能源耦合局域网中,能源输入输出路径和配置因多元化变得复杂,如图4所示的系统中,可通过外部电力供应利用电锅炉转化为热能,也可通过CHP获得。另外,能源互联网中各类设备的“即插即用”及故障情况下的“网络重构”,使得能量流路径具有多变的特征。能源路径选择和能源分配的多元化和多变性为能源互联网的设计和运行管理带来挑战。能源耦合结构优化、能量潮流优化、能量优化调度管理是局域能源互联网的几个主要问题。

对于能量流优化问题,类似于电力系统潮流优化,通常以系统能量消费总费用最低为目标,以各路径上的功率为控制对象,解决各元件生产或消耗功率的分配问题。在系统存在储能元件时,系统运行的经济性将受到储能效率的影响,同时除潮流方程,系统还受到储能容量的约束。因此,当系统包含储能时,需要考虑一定周期内多个潮流断面的联合优化。

对于能量优化调度管理,通常以一定时长内的系统总运行费用最低为目标对各时段系统内的各元件的功率分配进行优化,多篇文献建立了包含储能的多能源系统能量流的优化调度模型<sup>[53-56]</sup>。其中文献<sup>[53]</sup>将能量优化分配问题扩展为包含各元件起停状态的机组组合模型。在能量优化调度模型中,储能存在3种工作状态:储能、释能和空闲状态,需要

对储能工作状态的变化过程进行优化。可用图 5 所示的储能能量状态动态变化过程进行描述,其中储能的初始能量状态  $E(0)$  和末期能量状态  $E(N)$  给定,  $E_0$  表示储能的最低能量状态,  $E_k$  表示储能的最高能量状态。通过优化选择每一时段储能的状态变化,使得系统整体运行费用最低。在考虑储能时,系统的能量流优化和调度优化问题成为非凸非线性的混合整数规划问题,问题的规模和求解难度大大增加<sup>[57]</sup>。

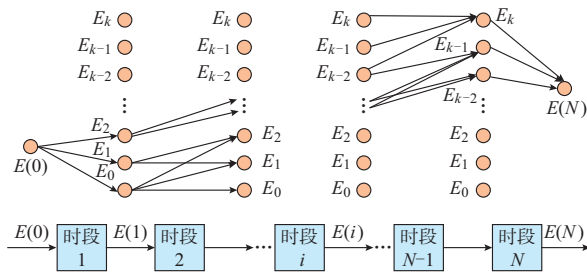


图 5 储能能量状态动态变化过程

Fig.5 Dynamic changing process of energy storage status

### 5.3 储能与能量转换装置的集成设计和协调配置

在上述能量管理问题中,储能结构和容量约束条件已知,而如何利用储能建立各能源之间的耦合关系满足潮流约束,并配置合理的储能容量,是能源互联网中有待解决的一项关键技术。对多能源耦合系统内的储能和转换装置进行设计时,首先应确定系统的评价指标。文献[58]总结了冷热电系统的综合评价指标,包括经济指标、能耗指标和环境指标 3 类。在对系统进行优化时,通常以经济性建立优化目标,包括系统的初始投资和考察周期内总运行成本。优化模型的约束条件包括系统潮流约束、设备负载率约束、可靠性约束<sup>[59]</sup>等,考虑储能后增加了储能能量状态和特性条件的约束。除了上述稳态指标和约束,储能的引入也将使系统的动态特性发生变化,如在热电联供系统中,储热增加了系统的热容,使系统的温度响应特性发生变化<sup>[60]</sup>。在电力供应中,当储能对系统频率和电压进行控制时,系统的频率和电压响应特性可能发生显著变化。在这些条件下,储能动态特性对可靠性、能源利用率等指标的影响将不能忽略。目前,关于储能在多能源耦合系统的设计和容量规划的研究目前还少有工作涉及,储能对系统能量传输和转换的经济性、效率、可靠性、动态特性等方面的影响也有待评估。

分布式储能在微电网中的应用属于多能源耦合局域网关键技术的子集,已有多篇文献对微电网中储能的配置、充放电过程优化进行建模,多围绕稳态运行目标开展,部分文献从微电网暂态运行能力对储能设计进行考察<sup>[61]</sup>,储能在微电网中的规划和控

制管理技术依然未形成系统性的方法。

### 5.4 考虑储能的能源交易和价格机制

能源互联网中,各参与方以自身利益最大化为目标参与对市场竞争,交易的自发性和无序性很强,可能对物理网络的运行管理带来压力。对于一个能源局域网,当外部能源价格发生变动时,将引起系统边际成本的波动,使系统内能源分配发生变化,为降低运行风险,管理者将考虑储能的应用<sup>[62]</sup>。市场价格波动越明显,即不确定性越大,储能越具备应用的空间。在广域能源互联网中,建立反应系统能量供需平衡及传输拥塞状态的弹性价格机制,各参与者依据能源价格变动做出响应,可形成基于价格信号的闭环控制<sup>[63]</sup>。当储能作为直接参与能源交易的主体时,储能的状态是反映市场供需情况的有效指标。在定价机制中考虑大容量储能的状态将对全局价格信号的优化起到重要的作用。新能源成为主要一次能源时,能源市场交易的不确定性增大,边际成本的变动增加,市场需要有一定的激励机制促进包括储能在内的柔性资源的参与。因此,储能不仅是市场机制设计的重要考虑因素,相关机制也是储能市场应用空间的决定性因素,建立考虑储能的能源交易和价格机制是重要的研究方向。

## 6 结语

1) 储能在能源互联网中存在 2 种应用模式: ①广域能源调度和交易应用; ②能源局域网。其需求和作用体现为: 为广域电网提供灵活调度电源; 支撑大规模新能源发电的高效利用; 是能源局域网中能源路由器的必要支持元件; 促进用户参与能源交易, 提高能源交易的自由度。

2) 储能承担了多种能源在时空尺度上的中转、匹配及优化的作用, 电化学储能、储热、氢储能、电动汽车等技术围绕电力供应, 实现了电网、交通网、天然气管网、供热供冷网的“互联”, 是未来能源互联网中极具前景的储能技术。

3) 新能源发电和储能的协调规划和调度技术、基于储能的能源路径和能源分配策略、储能与能量转换装置的集成设计和协调配置、考虑储能的能源交易机制是储能在能源互联网应用的关键技术。

## 参考文献

- [1] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
  - [2] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
- CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy



- internet and energy routers [J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 714-727.
- [3] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.  
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [4] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社,2015.
- [5] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J].电力系统自动化,2015,39(9):26-33.  
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33.
- [6] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3482-3494.  
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3482-3494.
- [7] 余贻鑫,秦超.智能电网基本理念阐释[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):694-701.  
YU Yixin, QIN Chao. Expatiation on the basic ideas of smart grid[J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 694-701.
- [8] CAO Junwei, YANG Mingbo. Energy internet-towards smart grid 2.0[C]// Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing, December 21-24, 2013, Los Angeles, USA: 105-110.
- [9] 查亚兵,张涛,黄卓,等.能源互联网关键技术分析[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):702-713.  
ZHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 702-713.
- [10] 袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.  
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.
- [11] 王松岑,来小康,程时杰.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):3-8.  
WANG Songcen, LAI Xiaokang, CHENG Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [12] 罗星,王吉红,马钊.储能技术综述及其在智能电网中的应用展望[J].智能电网,2014,2(1):7-12.  
LUO Xing, WANG Jihong, MA Zhao. Overview of energy storage technologies and their application prospects in smart grid[J]. Smart Grid, 2014, 2(1): 7-12.
- [13] 周林,黄勇,郭珂,等.微电网储能技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.  
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [14] 慈松,李宏佳,陈鑫,等.能源互联网重要基础支撑:分布式储能技术的探索与实践[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):762-773.  
CI Song, LI Hongjia, CHEN Xin, et al. Crucial support of energy internet: exploration and practice of distributed energy storage technology [J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 762-773.
- [15] 荆平,徐桂芝,赵波,等.面向全球能源互联网的大容量储能技术[J].智能电网,2015,3(6):486-492.  
JING Ping, XU Guizhi, ZHAO Bo, et al. Large-scale energy storage technology for global energy internet [J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 486-492.
- [16] 张文亮,丘明,来小康.储能技术在电力系统中的应用[J].电网技术,2008,32(7):1-9.  
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids [J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [17] AKHIL A. DOE/EPRI electricity storage handbook in collaboration with NRECA Sandia handbook[R]. 2013.
- [18] CASTILLO A, GAYME D F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: a survey [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 885-894.
- [19] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. Zürich: ETH, 2007.
- [20] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [21] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.  
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [22] SOCACIU L G. Thermal energy storage with phase change material [J]. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2012, 25(7): 75-98.
- [23] DEMIRBAS M F. Thermal energy storage and phase change materials: an overview [J]. Energy Sources: Part B Economics, Planning, and Policy, 2006, 1(1): 85-95.
- [24] 宋鹏翔,丁玉龙.化学热泵系统在储热技术中的理论与应用[J].储能科学与技术,2014,3(3):227-235.  
SONG Pengxiang, DING Yulong. A review on theory and application of chemical heat pump in thermal energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(3): 227-235.
- [25] 李廷贤,李卉,闫霆,等.大容量热化学吸附储热原理及性能分析[J].储能科学与技术,2014,3(3):236-242.  
LI Tingxian, LI Hui, YAN Ting, et al. Performance analysis of high-capacity thermal energy storage using solid-gas thermochemical sorption principle [J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(3): 236-242.
- [26] 吕泉,姜浩,陈天佑.基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J].电力系统自动化,2014,38(1):6-12.  
LYU Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6-12.

- [27] 崇明,朱钦,吴喜平,等.蓄能技术在电网侧的节能作用分析[J]. 低压电器,2012(24):55-58.  
CHONG Ming, ZHU Qin, WU Xiping, et al. Analysis of energy storage technology's energy saving effect on grid-side [J]. Low Voltage Apparatus, 2012(24): 55-58.
- [28] 李永亮,金翼,黄云,等.储热技术基础(Ⅰ)——储热的基本原理及研究新动向[J].储能科学与技术,2013,2(1):69-72.  
LI Yongliang, JIN Yi, HUANG Yun, et al. Principles and new development of thermal storage technology (Ⅰ) [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(1): 69-72.
- [29] 李永亮,金翼,黄云,等.储热技术基础(Ⅱ)——储热技术在电力系统中的应用[J].储能科学与技术,2013,2(2):165-171.  
LI Yongliang, JIN Yi, HUANG Yun, et al. Potential applications of thermal energy storage in electric power generation sector (Ⅱ) [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(2): 165-171.
- [30] 刘明义,郑建涛,徐海卫,等.电解水制氢技术在可再生能源发电领域的应用[C]//中国电机工程学会年会,2013年11月20-23日,成都:2598-2603.
- [31] KUDO A, MISEKI Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting [J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(1): 253-278.
- [32] 顾坚.硼氢化钙基储氢材料的吸放氢性能及其储氢机理研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [33] HAESLONCKX D, D'HAESELEER W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10/11): 1381-1386.
- [34] USDrive. Fuel cell technical team roadmap [EB/OL]. (2013-06-01) [2015-05-20]. [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt\\_roadmap\\_june2013.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/fctt_roadmap_june2013.pdf).
- [35] 侯明,衣宝廉.燃料电池技术发展现状与展望[J].电化学,2012,18(1):1-10.  
HOU Ming, YI Baolian. Progress and perspective of fuel cell technology[J]. Journal of Electrochemistry, 2012, 18(1): 1-10.
- [36] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等.基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J].电力系统自动化,2012,36(11):30-37.  
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.
- [37] 孙晓明,王玮,苏粟,等.基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J].电力系统自动化,2013,37(1):191-195.  
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [38] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [39] 于大洋,宋曙光,张波,等.区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J].电力系统自动化,2011,35(14):24-29.  
YU Dayang, SONG Shuguang, ZHANG Bo, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in chinese regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29.
- [40] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J].电力系统自动化,2010,34(20):22-29.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [41] 田立亭,张明霞,汪奕伶.电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J].中国电机工程学报,2012,32(31):43-49.  
TIAN Liting, ZHANG Mingxia, WANG Huanling. Grid impacts evaluation and solutions for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 43-49.
- [42] CNESA. 储能产业研究白皮书 2015[R].北京:中关村储能产业技术联盟,2015.
- [43] IMRE G. Grid energy storage[R]. Washington, USA: US Department of Energy, 2013.
- [44] 杨科,张远,李雪梅,等.风电与压缩空气储能系统的能量转化特性研究[J].工程热物理学报,2014,35(5):825-829.  
YANG Ke, ZHANG Yuan, LI Xuemei, et al. Analysis of energy conversion in hybrid system consists of wind power and advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 825-829.
- [45] 张远,杨科,李雪梅,等.先进绝热压缩空气储能的冷热电输出特性研究[J].热能动力工程,2013,28(2):134-138.  
ZHANG Yuan, YANG Ke, LI Xuemei, et al. Study of the cooling, heating and power output characteristics of an advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2013, 28(2): 134-138.
- [46] 唐西胜,刘文军,周龙,等.飞轮阵列储能系统的研究[J].储能科学与技术,2013,2(3):165-171.  
TANG Xisheng, LIU Wenjun, ZHOU Long, et al. Flywheel array energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 165-171.
- [47] POZO D, CONTRERAS J, SAUMA E. Unit commitment with ideal and generic energy storage units [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(6): 2974-2984.
- [48] DANESHI H, SRIVASTAVA A K. Security-constrained unit commitment with wind generation and compressed air energy storage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 167-175.
- [49] 郑静,文福拴,李力,等.计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划[J].电力系统自动化,2013,37(1):135-142.  
ZHENG Jing, WEN Fushuan, LI Li, et al. Transmission system expansion planning considering combined operation of wind farms and energy storage systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 135-142.
- [50] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等.储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2533-2543.  
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [51] 徐飞,闵勇,陈磊,等.包含大容量储热的电-热联合系统[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.  
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-

- heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [52] 王成山,武震,李鹏.分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J].电力系统自动化,2014,38(16):1-8.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8.
- [53] RAMIREZ-ELIZONDO L M, PAAP G C. Scheduling and control framework for distribution-level systems containing multiple energy carrier systems: theoretical approach and illustrative example [J]. International Journal of Electrical Power&Energy Systems, 2014, 66: 194-215.
- [54] PARISIO A, VECCHIO C D, VACCARO A. A robust optimization approach to energy hub management [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 98-104.
- [55] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and optimization of renewables applying the energy hub approach [C]// IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore: 83-88.
- [56] WASILEWSKI J. Integrated modeling of microgrid for steady-state analysis using modified concept of multi-carrier energy hub[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 891-898.
- [57] 高戈,胡泽春.含规模化储能系统的最优潮流模型与求解方法[J].电力系统保护与控制,2014,42(21):9-16.  
GAO Ge, HU Zechun. Formulation and solution method of optimal power flow with large-scale energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 9-16.
- [58] 张涛,朱彤,高乃平,等.分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J].中国电机工程学报,2015, 35(14):3706-3713.  
ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713.
- [59] NAZAR M S, HAGHIFAM M R. Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(6): 899-911.
- [60] SHARIATKHAHA M H, HAGHIFAMA M R, PARSAMOGHADDAMA M, et al. Modeling the reliability of multi-carrier energy systems considering dynamic behavior of thermal loads[J]. Energy and Buildings, 2015, 103: 375-383.
- [61] AGHAMOHAMMADI M R, ABDOLAHINIA H. A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid [J]. International Journal of Electrical Power&Energy Systems, 2014, 54: 325-333.
- [62] ZHENG Y, DONG Z Y, LUO F J, et al. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(1): 212-220.
- [63] YOU S, LIN J, HU J J. The Danish perspective of energy internet: from service-oriented flexibility trading to integrated design, planning and operation of multiple cross-sectoral energy systems[J]. Proceedings of the CSEE (in Chinese), 2015, 35(14): 3470-3481.

李健林(1976—),男,通信作者,教授级高级工程师,主要研究方向:大规模储能应用技术、新能源发电并网技术。E-mail: lijianlin@epri.sgcc.com.cn

田立亭(1983—),女,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:大规模储能应用技术。E-mail: tianliting@epri.sgcc.com.cn

来小康(1959—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:储能、超导和高电压技术。E-mail: laixk@epri.sgcc.com.cn

(编辑 蔡静雯)

## Outlook of Electrical Energy Storage Technologies Under Energy Internet Background

LI Jianlin, TIAN Liting, LAI Xiaokang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of the Energy Internet, the definition of electrical energy storage is put forward. Two application modes of energy storage in the Energy Internet are proposed. The current status of electro-chemical energy storage, electric vehicles, heat storage and hydrogen storage which will play important roles in the Energy Internet is analyzed. The key technologies of energy storage implementation in the Energy Internet are discussed. Finally, some key technologies of energy storage implementation in the Energy Internet are pointed out: the coordinated planning and scheduling of energy storage and renewable energy generation; the optimal energy path dispatch and energy management based on energy storage; the integrated design and configuration of energy storage and energy conversion; and the market mechanism for energy trading considering energy storage.

This work is supported by Basic and Prospective Program of State Grid Corporation of China (No. DG71-15-038) and Creative Research Foundation of China Electric Power Research Institute (No. DG83-15-003).

**Key words:** energy storage; smart grid; Energy Internet; energy interconnection; energy hub; renewable energy generation; multiple energy coupling