

能源互联网中储能系统发展趋势分析

基于能源互联网的典型特征，分析了能源互联网背景下储能在新能源发电、能源互联、多能源系统管理与优化以及电网经济运行与能源交易模式中的重要作用。介绍了电化学储能、储热、储氢和电动汽车等能源互联网中的关键储能技术，最后对能源互联网背景下储能发展趋势进行了探讨。

李建林 修晓青/中国电力科学研究院

0 引言

随着电改的进一步深入，储能系统作为一种有效的电力调节手段，其作用日益凸显。储能系统是能源互联网中的能源路由器，作为能源互联网关键设备可将大量可再生能源发电系统大规模接入电网中，直接关系到可再生能源的消纳与电能的灵活高效变换^[1-3]。

现有能源交易模式中，发供用电之间的信息传递模式是单向、相对静态的传输，易造成发电、用电之间的不平衡，能源互联网将重构上述能源交易体系，基于互联网及其他前沿信息技术，将清洁可再生电源作为主要电源，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，通过能源信息的共享，大幅提高能源生产和利用效率，在坚强可靠、透明开放、清洁环保、友好互动和经济高效等方面和智能电网相一致，实现能源信息的融合。

支持超大规模分布式发电系统和分布式储能系统接入是能源互联网的典型特征之一^[4]。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。储能技术作为其中的重要元素之一，发挥重要作用^[5-9]。储能从根本上解决了能源生产和消费的不同时性问题，将能源从时间和空间上进行平移，有效实现了能源的互联。智能电网体系下，储能在大规模集中式与分布式新能源发电并网和高效方面是关键支撑技术。在能源互联网体系下，储能技术的作用、运行模式将发生变革，其应用功能将得到进一步深化，应用层次将进一步细化，新的储能技术类型将获得发展机遇。

新电改在推动能源互联网发展方面发挥了重要作用。2015年3月，国务院下发了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（简称9号文），推进电价、配售电、电力交易机制和发电售电等多方面的改革，推动我国电力体制向市场化方向发展。9号文发布后，发改委在可再生能源、需求侧管理和输配电改革等方面又密集出台了一系列政策，作为9号文的配套实施细则。对于电网企业，去中心化和扁平化的分布式发电是能源互联网中电力供应的主要形式。2015年4月，国家能源局首次召开互联网工作会议，明确能源局将进行国家能源互联网行动计划的制定，该计划包括分布式能源、微电网、需求侧管理、合同能源管理以及基于数据服务的商业模式等内容。



李建林/教授级高工

关键词/Keywords

能源互联网 ·
储能技术 ·
新能源发电 ·
多能源系统 ·
能源交易模式 ·

国家电网公司软科学（管理咨询）项目（8142DG160001）。

随着电力体制改革的推进,电网运营模式和角色将发生改变,电力市场化交易机制、发电和售电企业的多元化发展、分布式电源的大量应用以及需求侧管理手段的革新都为储能的应用提供了契机。储能可在可再生能源并网领域、大型工商业用户、微电网以及辅助服务市场中将有望大规模应用。

未来的能源互联网中,将出现提供综合能源服务提供商的售电公司、分布式能源管理式的虚拟发电厂、基于大数据平台的互动能源交易系统,能源互联网将催生出大量新型的商业模式,这些商业模式对储能的推广应用将起到关键性的作用。现有工作大多未能突破储能在现有电网运营模式和商业模式的范畴,储能可在能源互联网中的应用研究和示范缺乏指导^[10-12]。

本文对能源互联网背景下储能的作用进行了分析,介绍了能源互联网中的关键储能技术,并对能源互联网背景下储能发展趋势进行了探讨。

1 能源互联网中储能作用

能源互联网中不同的应用模式对储能技术有不同的需求,储能可在能源互联网中所起到的作用可归纳如下。

1.1 推动新能源发电的发展

目前,全球范围内的可再生能源发电处于飞速增长的阶段,利用可再生能源发电供暖、制氢均是能源互联网中可再生能源利用的重要形式。然而,可再生能源出力具有强随机性和波动性,其大规模并网将显著提高电力系统功率不平衡的风险性,对电网的功率输送以及安全稳定运行带来较大的挑战^[13-15]。

储能技术在推动新能源发电的发展方面具体起到如下的作用。

1) 储能技术与可再生能源发电的联合,能够平滑可再生能源功率输出波动,减少随机性、提高可调度性,从而降低可再生能源对电力系统的冲击力度,提高跟踪计划出力的能力。

2) 通过电网级的储能应用可增强电网对可再

生能源发电的适应性,提高可再生能源的接入能力,在此应用下,储能可作为电网的可调度资源,具有更大的应用价值和应用空间。

3) 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。

储能技术在能源互联网中的应用极大程度地推动了可再生能源的发展,为建设以可再生能源为主导的电力系统建立坚实的技术基础。

1.2 提高能源互联网的灵活性和稳定性

在能源互联网中,具有良好的经济性和长寿命的大容量储能技术主要通过以下几个方面提高多元能源系统的灵活性和稳定性^[16-17]。

第一,储能技术有利于电网调峰调频。储能技术在提升电网调峰能力方面,根据电源和负荷的动态变化情况,储能系统可以及时可靠地响应调度指令,并根据指令改变其出力水平;在提高电网调频能力方面,可以减小因频繁切换而造成传统调频电源的损耗。目前,电网领域迫切需要低成本、大容量储能技术解决调峰调频的问题,以提高其供电可靠性及电能质量。

第二,储能技术能够改善供电质量和可靠性。当电网出现故障时,储能系统可作为备用电源持续为用户供电,以提高电网的供电可靠性;储能系统还可作为可控电源对电网的电能质量进行治理,消除电压暂降、谐波等问题,同时降低主干网络扩容投入,节约扩容资金。例如电池储能、飞轮储能、超级电容器储能技术以及氢储能均可广泛应用于电网领域。

第三,储能技术可以提高社会应急能力。储能技术的应用能够对电网的电能质量做出快速的判断和处理,美国作为应急服务项目的储能技术中多采用电池储能来实现。作为应急电源,储能系统的装机容量一般为10 kW~1 MW,充电时间为3~5 h,对抗灾性能和环境适应能力有很高要求。电池储能技术非常适合应用于应急电

源领域。随着能源互联网的发展,可以考虑为可能遭受灾害袭击的区域和重要用电场所配置应急电源,减少次生灾害发生,提高社会的整体应急能力。例如,在美国东西海岸、尤其是东海岸地区,电网公司正在积极投资建设储能设施。因为这些地区容易受到飓风影响,储能设施可以让电网更有弹性,在对抗飓风时更稳定。

1.3 为多元能源系统能量管理和路径优化提供支持

对于多元能源互联网系统,管理者可根据价格信息合理安排各能源的生产与消费,降低系统运行成本,提高系统可靠性和运行经济性。可根据系统需求及储能系统的能量状态信息,合理安排储能的充放电功率,确保系统供需平衡。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。储能的功率流方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。储能系统的安装布局、容量规划和充放电过程的优化对局域能源系统的经济高效运行发挥重要作用,要求储能系统具有动态响应系统运行状态的能力、较高的能量转换效率以及适宜的安装条件^[18]。

1.4 提高电网运行经济性和推动能源交易模式变革

能源互联网系统通过引入储能环节后,可以有效地实现需求侧管理,消除昼夜间峰谷差,平滑负荷,从而提高电力设备的利用效率,降低供电成本。例如,大规模储热技术在解决风电、光伏等新能源发电的弃风弃光问题中可起到重要的作用,以东北地区为例,冬季供热期间,为满足供热负荷,火电机组的调峰能力骤减,电网接纳风电空间能力不足,引发高比例的弃风现象,在可再生能源发电位置就近接入电锅炉供热、蓄热装置或在热电机组处配置储热装置,可以改善可再生能源发电的利用形式、提高热电机组运行灵活性和调峰能力,减少弃风/光现象,提高电网运行的经济性。

储能环节的引入不仅能够提高电网运行的经济性,还能推动能源交易模式的变革。传统的单向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,使电能与其他形式能源形成合理高效的分配格局。对于大型的能源供应商,利用大规模储能技术实时响应市场价格的变动,促进资源的合理分配和布局。同时,分布式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。外部能源成本高时,用户倾向于脱网;外部能源成本低时,用户购买电网电能。此外,储能技术提供了用户参与能源交易的可能性,用户根据自身的能源需求,结合储能的配置情况,向能源市场定制能源,在某些时段,可以生产者的角色向能源市场提供可靠的能源供给。锂离子电池储能、全钒液流电池等多种电池储能技术,结合电力电子技术,均可在用户侧得到应用,实现可靠供电,改善电能质量,节省用户电能电费支出。在电力市场机制下,储能的经济性对能源互联网的构建将起到关键性的作用。

2 能源互联网中储能技术分析

能源互联网将从根本上解决大规模可再生能源发电消纳、发供用电信息瞬时平衡等问题,实现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功能,为储能技术带来发展机遇,以不同技术特点为特征的电化学储能、储热、氢储能和电动汽车等储能技术类型将在能源互联网中发挥重要作用,如实现大规模的能量存储、支撑广域能源的调配、实现能源高效灵活应用以及与用能需求相结合实现能源需求实时响应等。

2.1 电化学储能

目前,电化学储能在电力系统中的应用处于快速增长中。截至2015年底,不考虑抽蓄、压缩空气和储热,全球电力储能的累计装机总量达946.8 MW,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38%。

目前,我国已开展多项兆瓦级的锂离子电池、液流电池、铅酸电池和超级电容等电化学储能技术的示范应用。如国家风光储输示范工程一期工程安装了14 MW/63 MW·h的磷酸铁锂电池、2 MW/8 MW·h的钒液流电池储能以及2 MW/12 MW·h的胶体铅酸电池,用于提高风光发电的可调性、提高并网能力。深圳市宝清储能电站安装了4 MW/16 MW·h的锂离子电池储能系统,用于实现配电网的多种应用功能,辽宁卧牛石风电场安装了5 MW/10 MW·h的全钒液流电池储能系统,用于提高风电的可调度性。电池储能系统在离网或孤岛地区,可以充分利用风能和太阳能等清洁能源,实现稳定可靠的电力供应,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,相关政策的支持,使得户用光伏发电模式得到了推广,用户侧安装光伏、配置合适比例的储能系统能实现一定的经济效益。目前,国内外大多数电化学储能项目主要用于可再生能源并网、辅助服务、分布式发电及微电网等领域。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。

2.2 储热

大规模储热技术在解决冬季供暖期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,热电机组运行于以热定电模式,为满足供热负荷需求,承担供热机组的电力调峰深度受到限制,尤其是在新能源比例较高的三北地区,带来严重的弃风/光现象。为热电机组配置储热装置,可一定程度上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电站安装有两台储热水罐,容积为44 000 m³,放热能力为330 MJ/s。在风电出力较大时,降低机组发电功率,采用储热罐维持热力供应。另外,采用蓄热式电锅炉供热,电锅炉利用弃风制热存储

在蓄热装置或向用户直供热,也是促进风电消纳的手段之一。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每小时。2011年投运的吉林大唐洮南风电供热项目是我国首个风电供热项目。2015年6月,国家能源局于发布了《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。储能技术用户侧,利用低谷期的电力蓄冷,转移到高峰期以降低生产和生活中冷量供应成本,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、冰和优态盐等。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。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。

2.3 储氢

氢能利用涉及制氢、储氢、输氢和用氢四个环节,天然气制氢、煤制氢是目前氢气工业生产的主要方式。近年来有学者开展了利用新能源发电电解水制氢的示范应用。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,利用弃风或电网负荷低谷时期的富余电力制氢,可以提高新能源发电的利用率,解决弃风问题,并且从技术上来看,现有的碱性电解槽和固体聚合物电解水制氢技术能够适应风电的随机波动性。光催化直接裂解水是一种理想的利用新能源制氢的方法,其关键在于半导体光催化剂材料的突破,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。

氢气通常采用高压或低温液化方式存储,但存在能耗大、安全性差等问题,固态材料储氢(包括物理吸附储氢和化学氢化物储氢)是最具前景的储氢技术,但其储氢容量、热力学和动力学性能及可逆性等方面有待提高。氢气和甲烷在能量密度、热值和渗透率等方面具有显著差异,利用天然气管网传输氢能是较为经济的输送方

法,并且不会对现有天然气管线设施带来不利的影响。

2.4 电动汽车

纯电动汽车可分为燃料电池电动汽车(FCEV)和电化学电池电动汽车(BEV),其中BEV已进入商业化运营阶段,FCEV也即将步入商业化。大规模电动汽车的有序充电与并网,可以调节电网负荷需求,改善电网运行特性,采用峰谷分时电价或实时电价机制对电动汽车的充放电策略进行引导,可以避免电动汽车在负荷峰值期大规模接入电网,减少电动汽车充电对电网造成的压力。此外,峰谷价差足够大使得电动汽车在负荷高峰期放电具有经济性,可以实现削峰填谷、延缓电网设备投资等功能。

电动汽车的大规模并网将为电网带来庞大的储能资源储备,引入激励机制,可以有序引导电动汽车以储能的模式参与电网的运行,与可再生能源发电等不可调度性电源实现有序配合,在今后能源互联网的发展进程中是一项重要应用方向。电动汽车规模化并网与传统储能设施的差异在于电动汽车的分散性和随机性,其电网级的应用需要有效的政策引导,才能发挥正向效益,另外充电设施的分散分布、用户充电需求及动力电池容量等条件的约束,使得电动汽车具有分散性强的特点,其有效利用为电网的监测、传感、能量管理和控制提出了极大的挑战。除分散的户用电动汽车外,电动公交也是电动汽车储能能力的重要组成部分,例如青岛薛家岛已建成了兆瓦级公交车队充换电站,可同时为280辆公交车提供充换电服务,最大充放电功率为4.32 MW。此外,电动汽车可作为储能单元参与家庭能量管理、微电网协调控制和应急电源等,与风电、光伏等分布式电源有序配合,充分利用清洁能源,参与电力市场,实现用户、微电网的效益最大化,是能源互联网中电动汽车储能运行模式的一个重要应用方向。

3 能源互联网储能发展趋势

1) 智能电网及能源互联网的架构和运行模

式,划分能源互联网中储能技术应用领域,研究电化学储能、储热和储氢等各类型储能技术在各领域及应用场景的适用性。

2) 能源互联网中储能在电力辅助服务、微电网、分布式发电以及分布式电源虚拟发电厂中将发挥重要作用,研究电力辅助服务定价和交易机制对储能应用经济性的影响,分析与传统电源、需求侧管理等传统手段的竞争能力,评估电价、补贴等对储能应用经济性的影响。电动汽车大规模推广应用背景下,退役动力电池在能源互联网中梯次利用的经济性和适用场景分析,解决动力电池在能源互联网中的二次利用问题。

3) 智慧城市、社区等局域能源网是能源互联网中的主要部分,研究储能在智慧城市、社区多能源供应等能源互联网场景中,储电、储冷、储热和储氢与热电联供机组、热泵和燃料电池等能源转换设备的匹配方式,探讨储能应用方案,研究储能在局部能源交易系统中的运行模式。

4) 能源互联网将从根本上解决弃风、弃光等现存问题,采用新能源发电制氢、制热是解决新能源发电消纳作用的重要途径,分析储能在提高大规模新能源利用效率和节能减排效益方面的作用和影响,研究对各类储能技术的定量需求与运行模式。

5) 电力体制改革趋势下,研究能源供应模式和商业运行模式可能产生的变革,分析储能市场化应用的影响因素,研究储能技术发展对外界政策和市场环境的需求。

4 结束语

1) 能源互联网中,储能技术将在新能源发电、提高能源互联网的灵活性和稳定性、为多元能源系统能量管理和路径优化提供支持,以及提高电网运行经济性和推动能源交易模式变革中发挥重要作用。

2) 综合考虑技术成熟度及发展前景,电化学储能、储热、储氢和电动汽车是关键储能技术。

3) 能源互联网中储能发展趋势主要集中在:能源互联网的架构和运行模式;储能在电力辅助

服务、微电网、分布式发电、大规模新能源发电及局域能源网中的作用；能源供应模式和商业运行模式的探索等方面。

参考文献

- [1] Rifin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York, USA: Palgrave MacMillan, 2011: 46-55.
- [2] 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.
- [3] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命 [M]. 张体伟, 孙毅宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012.
- [5] 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.
- [6] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术 [J]. 电网技术, 2016, 40 (1): 114-124.
- [7] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索 [J]. 电网技术, 2015, 39 (11): 3014-3022.
- [8] Nicola B, Angelo P, Michele Z. The internet of energy: a web-enabled smart grid system [J]. IEEE Network, 2012, 26 (4): 39-45.
- [9] Boyd J. An internet-inspired electricity grid [J]. IEEE Spectrum, 2013, 50 (1): 12-14.
- [10] Kinhekar N, Padhy N P, Gupta H O. Multi-objective demand side management solutions for utilities with peak demand deficit [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55: 612-619.
- [11] Guerrero J M, Chandorkar M, Lee T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1254-1262.
- [12] López M A, Torre S de-la, Martín S, et al. Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64: 689-698.
- [13] 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, 31 (1): 14-18.
- [14] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (23): 15-25.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Akella R, Meng F, Ditch D, et al. Distributed power balancing for the FREEDM system [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, 2010: 7-12.
- [18] Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (1): 145-155.

(收稿日期: 2016-05-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告