

Energy Storage Technologies in Smart Grid

Zhanliang Tao, Jun Chen

Key Laboratory of Advanced Energy Materials Chemistry (Ministry of Education), Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering, Nankai University, Tianjin

Email: taozhl@nankai.edu.cn, chenabc@nankai.edu.cn

Received: Jun. 28th, 2015; accepted: Jul. 13th, 2015; published: Jul. 16th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, the features and energy storage technologies for smart grid are expounded. The performance characteristics and the state-of-the-art in energy storage technology including pumped hydroelectric, compressed air, flywheel, superconducting magnetic, supercapacitor, battery, and other important energy storage technology are summarized. According to the characteristics and the requirements from smart grid, the developing trend and application prospects of multiple energy storage technologies are provided.

Keywords

Smart Grid, Energy Storage, Distributed Generation, Micro-Grid

智能电网中的储能技术

陶占良, 陈 军

南开大学, 化学化工协同创新中心, 先进能源材料化学教育部重点实验室, 天津

Email: taozhl@nankai.edu.cn, chenabc@nankai.edu.cn

收稿日期: 2015年6月28日; 录用日期: 2015年7月13日; 发布日期: 2015年7月16日

摘 要

本文阐述了智能电网的特点和智能电网对储能的技术需求, 概括了抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、

文章引用: 陶占良, 陈军. 智能电网中的储能技术[J]. 智能电网, 2015, 5(4): 155-163.

<http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.54019>

超导磁储能、超级电容器储能和电池储能等重要储能技术的特点及其发展现状, 并对储能技术在智能电网中的应用进行了展望。

关键词

智能电网, 储能, 分布式发电, 微电网

1. 引言

电力工业作为国民经济的基础产业, 为经济发展和社会进步提供了重要保障。随着经济的发展和社会的进步, 电力、能源可持续供给与经济发展需要间的矛盾越来越突出, 环境保护和应对全球气候变化的压力也越来越大, 传统的经济增长模式正面临着严峻的考验。积极发展智能电网, 推动清洁能源大规模开发利用, 实现低碳经济, 已成为国际电力发展的现实选择。从本世纪初开始, 基于新能源技术、分布式发电技术、大规模储能技术、超远距离超大规模输电技术、信息网络技术和智能控制技术的快速发展, 世界电网进入智能电网发展阶段[1]。在 2015 年的政府工作报告中, 我国第一次从国家层面提出了制定“互联网+”的行动计划, 作为能源与互联网有机结合的一部分, 智能电网的建设将作为能源互联网(Energy Internet)的排头兵, 成为未来展示电力工业竞争力及“互联网+”的一个重要舞台。

2. 智能电网及可再生能源对智能电网的影响

虽然各国智能电网的定义不同, 但对智能电网的根本要求是一致的, 都充分强调了智能电网的自动化、智能化以及构建连接所有发电端和用电端的互联网信息系统, 即“更坚强、更智能”。坚强是智能电网的基础, 智能是坚强电网充分发挥作用的关键。智能电网是包括发电、输电、变电、配电、用电、调度等各个环节和各电压等级的有机整体, 是一个完整的智能电力系统(图 1)。具有坚强可靠、自愈能力强、经济高效、透明开放、友好互动、清洁环保等特性[2]。

智能电网有利于促进可再生能源发展与利用, 提高清洁电能在终端能源消费中的比重, 降低能源消

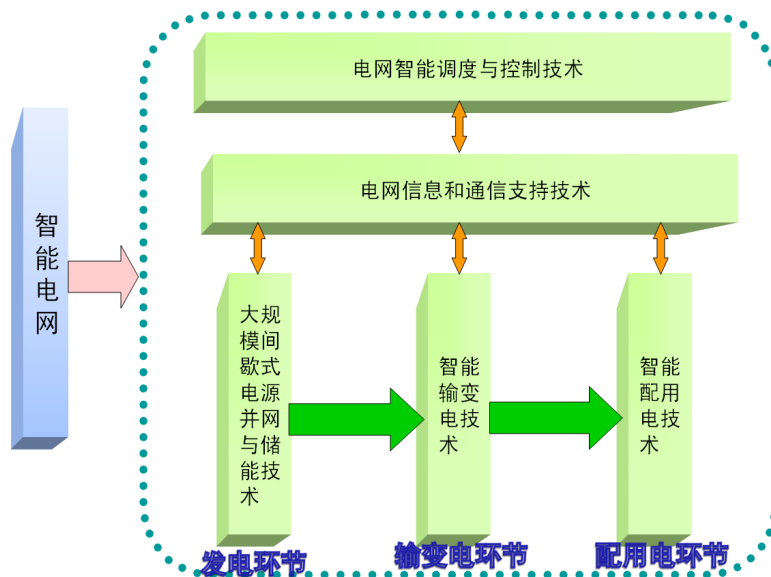


Figure 1. The architectures in smart grid

图 1. 智能电网的涵盖环节

耗和污染物排放。随着分布式电源渗透率的提高，风力发电、光伏发电等各种不同规模的小型发电设备将广泛分布于用户侧。已经确定并下发的新电改方案将从支持分布式可再生能源开始，为以智能电网为依托的能源互联网发展铺平道路。一方面，积极推进可再生能源发电与其他电源、电网的衔接；另一方面，将全面放开用户侧分布式电源市场，准许个人投资建设分布式电源接入各电压等级的配电网和终端用电系统。

风电、光伏等可再生能源的原动力均不可控，是否处于发电状态以及出力大小都取决于自然资源状况。可再生能源发电的不确定性和不可控性使得大规模风力发电机组或光伏阵列的并网给系统带来母线电压越限、电网电压波动和闪变等一系列电压稳定问题和频率稳定性问题。间歇性电源的不可预知性，也使调度运行人员无法做出有效的发电计划，进而导致系统备用电源、调峰容量和系统运行成本增加，并威胁系统安全稳定运行，影响电力平衡。同时，电力系统中必须有足够的调峰能力来维持系统的功率平衡，但以风电为主的可再生能源发电并网运行，存在着反调峰特性，调峰能力不足一直是各同步系统普遍存在的问题。此外，我国陆上风能、太阳能的大规模开发将主要集中在西部、北部等偏远地区，新能源资源与电力需求呈现逆向分布，现有电网的资源配置能力尚难以满足千万千瓦级新能源发电基地大规模、远距离的外送需求。

风速或光照的随机性和波动性特点与现代电网对电源的“可控、可调”要求是矛盾的，也是制约电网接纳风电、光伏等清洁能源的重要约束。随着能源互联网及智能电网的推进，风电、光伏等可再生能源并网应用规模将不断扩大，这对电网安全稳定运行带来了越来越大的挑战。

3. 储能在电网中的作用

现代储能技术在电力系统中发挥着重要作用。储能技术是实现灵活用电，互动用电的重要基础，是实现智能化使用能源，解决能源危机的重要技术发展方向，也是发展智能电网的重要基础工作。“储”作为动力系统运行的补充环节，可从时间上有效隔离电能的生产和使用，彻底颠覆电力系统供需瞬时平衡的执行原则，将电网的规划、设计、布局、运行管理以及使用等从以功率传输为主转化为以能量传输为主，给电力系统运行带来革命性的变化，也将对传统电力起到改善和改良的作用[3]。储能技术在电网中所发挥的作用主要体现在以下几方面[4]：

1) 削峰填谷

电力生产过程的连续性，要求发、输、变、配电和用电在同一瞬间完成，因此发电、供电、用电之间必须随时保持平衡，而且电力系统必须有一定的发电备用容量。电力需求在白天和黑夜、不同季节间存在巨大的峰谷差，从建设成本、资源保护的角度出发，通过新增发输配电设备来满足高峰负荷的需求变得越来越困难。而且，可再生和分布式能源越来越多的应用使得分散的储能系统的重要性日益增加。储能可以有效地实现需求侧管理，发挥削峰填谷的作用，消除昼夜峰谷差，改善电力系统的日负荷率，使发电设备的利用率大大提高，从而提高电网整体的运行效率，降低供电成本。

2) 改善电能质量、提高可靠性

借助于电力电子变流技术，储能技术可以实现高效的有功功率调节和无功控制，快速平衡系统中由于各种原因产生的不平衡功率，调整频率，补偿负荷波动，减少扰动对电网的冲击，提高系统运行稳定性，改善用户电能质量。同时，在突发事故和电网崩溃时，储能设备将充当不间断电源/应急电源，为电网恢复争取时间，避免损失扩大。

3) 改善电网特性、满足可再生能源需要

储能装置具有转换效率高且动作快速的特点，能够与系统独立进行有功、无功的交换。将储能设备与先进的电能转换和控制技术相结合，可以实现对电网的快速控制，改善电网的静态和动态特性，在平

抑、稳定风能发电或光伏发电的输出功率和提升新能源的利用价值方面具有重要作用。根据现行的风电场并网标准 GB/T19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》，风电场有功功率变化应满足电网调度部门的要求，风电场有功功率变化限制见表 1。通过高效储能装置及其配套设备，与风电/光伏发电机组容量相匹配，支持充放电状态的迅速切换，确保并网系统安全稳定，满足可再生能源系统的需要。

4. 电网中的储能技术需求及发展现状

作为新兴产业，全球储能项目在电力系统的装机容量已从 2008 年的不足 100 MW 发展到 2013 年的 726.7 MW (不包含抽水蓄能、压缩空气储能及储热)，年复合增长率(CAGR)达到 193% [5]。根据能量存储方式的不同，储能方式分为机械、电磁、电化学和相变储能四大类型。其中机械储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能；电磁储能包括超导、超级电容和高能密度电容储能；电化学储能包括铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫和液流等电池储能；相变储能包括熔融盐和冰蓄冷储能等。各种储能技术在能量和功率密度等方面有着明显区别，能量型储能装置因其能量密度高、充放电时间较长，主要用于平滑低频输出分量；功率型储能装置因功率密度大、响应快，主要用于平滑高频输出分量[6]。表 2 比较了不同应用场合对储能装置的技术要求。

抽水储能(Pumped Hydroelectric Storage, PHS)是在电力系统中应用最为广泛的一种成熟的储能方式，其主要应用领域包括削峰填谷、调频、调相、紧急事故备用、黑启动和提供系统的备用容量，还可以提高系统中火电站和核电站的运行效率。目前，抽水蓄能电站的设计规划已形成规范，PHS 机组发展方向是高水头、大容量机组设备制造技术、以及提高机组的智能化水平。

压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)是一种调峰用燃气轮机发电厂，建设投资和发电成本均低于抽水蓄能电站，其安全系数高，寿命长，可以冷启动、黑启动，响应速度快，主要用于峰谷电能回收调节、平衡负荷、频率调制、分布式储能和发电系统备用。但其能量密度低，并受岩层等地形条件的限制，未来发展主要是探索适宜建设压缩空气储能电站的地理资源。新近提出的先进绝热 AA-CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage)将不使用化石燃料，并利用热储能循环提高整体效率。使用地上储气设施的小型 CAES 正在快速发展，此类系统可用于备用电源，孤立地区微电网等。

飞轮储能(Flywheel Energy Storage, FES)主要用于短时间大功率放电和电力调峰的场合。由于自放电率高的制约因素，低速 FES 主要用于短期储能。由于使用真空和悬浮技术，高速 FES 自放电情况得到有效改善。FES 技术的主要研究方向为转子材料的研究以进一步提高飞轮转速和能量密度，高速电机的研发以提高循环效率、高承载力轴承的开发以及飞轮阵列技术等。

超导磁储能(Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)是将通过变流器进入线圈的电能转换为磁能进行储存的一种储能技术，功率输送时无需能源形式的转换，响应速度快(ms 级)，转换和循环效率高，具有较大的功率密度和比容量，可以实现与电力系统的实时大容量能量交换和功率补偿。其主要制约因素为超导体材料和维护超导磁储能低温环境的费用很昂贵，因此微型和中小型 SMES 系统对于输配电等智能电网的应用更加经济可行。SMES 的发展重点在于基于高温超导涂层导体研发、适于液氮温区运行的

Table 1. The recommended limit for active power change of wind farm

表 1. 风电场有功功率变化限值推荐表

风电场装机容量/MW	10 min 最大有功功率变化限值/MW	1 min 最大有功功率变化限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

Table 2. The typical energy storage technologies for electric power applications
表 2. 应用于电力系统的典型储能技术比较

储能类型	典型额定功率	持续时间	效率	优势	劣势	应用场合	
抽水蓄能	100~5000 MW	4~10 h	70%~85%	大功率、大容量、低成本	受地理条件限制、建设周期长	辅助削峰填谷、调频、黑启动和备用电源	
机械储能	压缩空气储能	100~300 MW	6~20 h	40%~50%	大功率、大容量、低成本	受地理条件限制	备用电源、黑启动等
	微型压缩空气储能	10~50 MW	1~40 h	-	低成本	受地理条件限制	调峰
飞轮储能	5 kW~10 MW	15 s~30 min	80%~90%	高功率密度、快速响应、长寿命	低能量密度、自放电率高	提高电力系统稳定性、不间断/应急电源(UPS/EPS)系统、电能质量等	
电磁储能	超导储能	10 kW~20 MW	1 ms~15 min	80%~95%	响应速度快、功率密度大	低能量密度、高制造成本	电能质量管理、提高系统稳定性和可靠性
	超级电容器	10 kW~1 MW	1 s~1 min	70%~80%	高能量转换效率、长寿命、高功率密度	低能量密度、价格高	短时电能质量调节、平滑可再生能源功率输出等
铅酸电池	1 kW~50 MW	1 min~3 h	60%~70%	价格低、可靠性好、安全稳定性	功率密度低、能量密度低、循环寿命短	电能质量控制、备用电源、黑启动和 UPS/EPS	
电化学储能	锂离子电池	100 kW~100 MW	数小时	70%~80%	大容量、高能量密度、高功率密度、高能量转换效率	成本、安全性、循环寿命及规模化	平滑可再生能源功率输出、辅助削峰填谷、电能质量调节等
	全钒液流电池	5 kW~100 MW	1~20 h	65%~80%	容量和功率相互独立、长寿命、可 100% 深度放电	低能量密度、效率不高	辅助削峰填谷、平滑可再生能源功率输出等
钠硫电池	100 kW~100 MW	1~20 h	70%~80%	大容量、高能量密度、高能量转换效率	安全因素、运行维护费用高	平滑分布式、可再生能源功率输出、辅助削峰填谷等	

MJ 级系统, 解决高场磁体绕组力学支撑问题, 并与柔性输电技术相结合, 进一步降低投资和运行成本。

超级电容器具有循环效率较高、充放电速度快、功率密度高、循环充放电次数多、工作温度范围宽等特点, 其制约因素包括能量密度低、自放电率较高、成本较高等, 在电力系统中多用于短时间、大功率的负载平滑和电能质量高功率场合, 如大功率直流电机的启动支撑、动态电压恢复器等, 在电压跌落和瞬态干扰期间提高供电水平。超级电容的研究方向包括复合电极材料和电解液材料技术、提高超级电容的能量密度和功率密度、电压均衡技术等。

电化学储能(Battery Energy Storage, BES)是通过化学反应将化学能和电能进行相互转换的储能方式, 蓄电池是能量转换的主要载体。根据储能技术特点、技术成熟度及其产业化程度, 现阶段电池储能系统是一种比较适合电力系统应用的储能电源, 具有模块化、响应快、商业化程度高、系统安装灵活、建设周期短的特征[7]。不同的电池类型有各自的特点, 这就为大规模储能应用的不同需求提供了多样化的选择。铅酸电池在电力系统正常运行时为断路器提供合闸电源, 在发电厂、变电所供电中断时发挥独立电源的作用, 在目前备用电源领域应用规模最大。其主要制约因素是较低的比能量和比功率, 如何提高循环次数以及废旧电池的处理。此外, 超级铅酸电池作为新技术(典型代表有铅碳电池), 比传统铅酸蓄电池功率可提高 20%~50%, 寿命可延长 2~3 倍, 可用于混合动力汽车、太阳能/风能发电等领域。

钠硫电池是另一种可应用于电网的重要电池储能技术, 钠硫电池系统在电力系统和负荷侧已进行了

成功地应用, 用于平滑可再生能源发电功率输出、削峰填谷、应急电源等领域。钠硫电池比能量高, 效率高, 几乎无自放电, 深度放电性能好, 便于模块化制造、运输和安装, 建设周期短, 可根据用途和建设规模分期安装, 很适用于城市电网大容量储能调峰。其制约因素包括较高的维护费用和安全问题等, 另外, 钠硫电池是工作在 300℃ 附近的高温电池, 钠、硫离子的腐蚀性对电池结构及材料都提出了较高的要求。由于钠资源丰富和容易实现低成本生产, 室温钠离子储能电池的研究开始受到人们的广泛关注。

液流电池电化学极化小, 能够 100% 深度放电, 储存寿命长, 额定功率和容量相互独立, 可以通过增加电解液的量或提高电解质的浓度达到增加电池容量的目的, 并可根据设置场所的情况自由设计储藏形式及随意选择形状, 适用于大容量储能应用[8]。全钒液流电池是较为成熟的一种液流电池技术, 在全球已有较多的示范工程。根据全钒电池运行特性, 其应用领域多涉及辅助调峰、平滑风电和光伏系统输出功率、边远地区供电、工厂及办公楼供电、不间断电源等场合。全钒液流电池在电力系统的发展方向涉及风能/光伏发电相配套的储能系统, 如何提高比容量和转换效率, 以及降低成本等。

近年来, 锂离子电池各项关键技术的突破以及资源和环保方面的优势, 使得锂离子电池产业发展速度极快, 在新能源汽车、新能源发电、智能电网、国防军工等领域的应用越来越受到关注, 目前美国、日本、中国等国家均已建成兆瓦级锂离子电池储能应用示范项目。大规模锂离子电池可用于改善可再生能源功率输出、辅助削峰填谷、调节电能质量以及用作备用电源等。锂离子电池已经拥有很多种类, 其单体工作电压也有所区别(大约 3 V~4.2 V), 当前已趋于成熟的小型锂离子电池产业多服务于小型电器、电动工具以及电动交通工具。其中磷酸铁锂电池具有价格相对低和安全性能高的特点, 已经开始在电动汽车及电力储能系统中示范运行。由于工艺和环境温度差异等因素的影响, 储能电池(组)系统指标往往达不到单体水平, 使用寿命较单体缩短数倍甚至十几倍。规模化储能型锂离子电池的研发规模离产业化还有一定距离, 大容量集成的技术难题尚有待验证, 正逐渐成为当前电池产业领域关注的焦点。随着锂离子电池制造技术的完善和成本的不断降低, 锂离子电池储能将具有良好的应用前景。锂电池的发展方向为研发新型锂离子电池、开发高性能和全新结构材料等, 降低投资成本, 提高电池的循环寿命和安全性。

在超高容量大规模储能技术中, 抽水蓄能和压缩空气技术相对成熟, 适合 100 MW 以上级别储能系统。钠硫电池、钒电池、锂电池、铅酸电池和飞轮储能已经开始运用于兆瓦级别的项目中, 从技术分类上看, 钠硫电池的装机比重最大(为 46%), 铅酸电池技术为覆盖功率范围最宽、技术成熟度最高的储能技术, 而锂离子电池则是应用领域最广的储能技术。从应用分类上看, 储能技术较多地应用于风电场、光伏电站及分布式发电和微网领域。为适应智能电网的发展, 除抽水蓄能外, 还应大力发展布置灵活的电池储能技术, 如锂离子电池、钠硫电池、液流电池以及超级电容器等[9]。

5. 储能技术在智能电网中的应用展望

5.1. 储能技术与大规模电力/可再生能源电力电网系统

储能技术在大规模电力/可再生能源电力系统中的应用需要根据不同地区的实际情况而定, 此外还需考虑额定功率和容量、响应时间、安全稳定性、技术成熟度、经济成本等。大规模电力系统需要较多地利用大规模储能技术以达到储能大容量/功率的要求。从整体上看, 大部分大规模储能技术仍处于产业化初级阶段, 整体成本还比较高, 需要更长时间的运行验证, 因此现阶段有必要进行更多的示范验证工程。

从应用的角度来看, 在电能质量保证方面, 飞轮、超级电容器、部分蓄电池(如钠硫和液流)、超导磁储能系统能够使发电厂输出功率平滑, 确保电网电能稳定; 在电能能量管理方面, 随着新能源装机容量的提升, 储能系统的容量也必须提高, 新型压缩空气、热能储存、部分蓄电池(如铅酸、钠硫、锂离子和液流)系统具有潜在的调峰功能, 可以适合风电、太阳能发电等的大规模储存。从技术角度来看, 储能技

术的长寿命、低成本、高安全性是目前更为关注的问题。

在世界范围内已建成一些示范性工程,如加拿大 VRB Power Systems Inc.在美国、德国等地的风光储能发电并网工程。我国在这个领域也在加快部署,例如正在运行中的国网张北项目是目前全球最大的风光储输工程。

5.2. 储能技术与分布式发电及微电网系统

分布式发电是指利用各种可用的分散存在的能源,包括可再生能源(如小型风能、太阳能、生物质能、小型水能、潮汐能等)和本地可方便获得的化石类燃料(主要指天然气)进行发电。分布式发电系统能够充分利用清洁和可再生能源,是实现节能减排目标的重要举措,也是集中式发电的有效补充,既可发电、也可供冷、供热,是一种能源的高效利用方式[10]。为使分布式发电得到充分利用,微型电网应运而生。

微电网是由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发、配、用电系统[11]。微电网系统既可以孤立运行,又可以并网,接近电力消费终端,是分布式发电或智能电网中的典型应用形式,多接入中低压配电网或用户侧。分布式发电及微网领域是近年来储能技术应用的热点,在中国主要体现在解决无电人口用电、孤岛微网等方面。在德国和日本,则主要体现在居民、工业、商业等用户侧安装储能实现自发自用。

微网系统容量相对较小,一般为 kW 级别到几十 MW 级别,微网的电压及频率稳定问题在微网电源为风电、光伏等可再生能源发电时更为突出。针对其特点,储能单元被认为是此类系统的必备部件。储能单元可维持系统能量的瞬时平衡,以平抑风电、光伏等间歇式电源发电出力波动或负荷突变,或者克服微型燃气轮机和燃料电池等响应速度较慢,负荷跟踪能力较差等问题,起到抑制系统和输出功率的扰动、用于短时过渡供电、调峰填谷、保持电压频率稳定、提供可靠备用电源、提高系统并网运行可靠性和灵活性等作用。

目前全球规划、在建及投入运行的微电网示范工程超过 400 个,已有一些建成的储能示范工程应用于分布式发电与微电网系统,如美国的 CERTS 和 NERL 微网示范平台、德国的 DeMoTec 微网示范平台、日本的 KYOTO 微网示范工程、我国的风光互补离网项目、国家风光储输示范工程等。近年来各种新型储能技术如锂电池、液流电池、钠硫电池、超级电容器和飞轮储能等,在技术经济性上取得了长足的进步,同时它们也适宜于微网的储能应用。

5.3. 储能技术与电动汽车

电动汽车与智能电网相结合的 V2G (Vehicle to Grid)模式是一种新近发展中的技术。电动汽车能够实现汽车能源从石油向电力的重大转变,有效降低我国汽车工业发展对石油的依赖,保障国家能源安全。同时,电动汽车作为一种储能设备,具有自身的优势。由于电动汽车较长时间地处于停止状态,车载电池可以看作一个分布式移动储能单元。其次,电动汽车的电池能量密度高,即使淘汰下来的二次电池也可以作为储能设备提供几小时的稳定电量。利用 V2G 技术,使电动汽车具有潜在地参与较小规模电力电网系统调峰调频、电能质量保证和备用电源等应用。电动汽车蓄电池(如铅酸、锂电池等)甚至超级电容器都有可能作为 V2G 系统的储能单元,常见的动力电池参与储能的应用主要包括电池的梯次利用以及 V2G 技术,通过与电网的能量管理系统建立通信,从而达到电动汽车与智能电网能量转换互补的目的。电动汽车产业的发展也会带来电动汽车作为储能设备的应用推广,为储能产业迎来新的发展商机。

根据大规模储能技术在电力系统中的发展及应用前景,以及适合规模化应用的储能技术评价指标和选择依据分析,国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组概括了大规模储能技术在我国发展及应用的路线图[12],如图 2 所示。



Figure 2. The development and application roadmap for large-scale energy storage technologies in China
图 2. 大规模储能技术在中国发展及应用的路线图

6. 结论

储能作为智能电网、可再生能源接入、分布式发电、微电网以及电动汽车发展必不可少的支撑技术而备受关注, 目前其应用主要涉及: 1) 配置在电源侧, 平滑短时出力波动, 跟踪调度计划出力, 实现套利运行, 提高可再生能源发电的确定性、可预测性和经济性; 2) 配置在系统侧, 实现削峰填谷、负荷跟

踪、调频调压、热备用、电能质量治理等功能,提高系统自身的调节能力;3)配置在负荷侧,主要利用电动汽车的储能形成虚拟电厂参与可再生能源发电调控。储能技术正朝着转换高效化、能量高密度化和应用低成本化方向发展,通过试验示范和实际运行日趋成熟,确保了系统安全、稳定、可靠的运行。

储能技术能否在电力系统中得到推广应用,取决于是否能够达到一定的储能规模等级,是否具备适合工程化应用的设备形态,以及是否具有较高的安全可靠性和技术经济性。在各种储能技术中,抽水蓄能和压缩空气储能比较适用于电网调峰;电池储能比较适用于中小规模储能和新能源发电;超导电磁储能和飞轮储能比较适用于电网调频和电能质量保障;超级电容器储能比较适用于电动汽车储能和混合储能。目前,大规模储能技术在全球都还处于发展初期,尚未形成主导性的技术路线,无论哪一种储能技术,都不能满足大规模储能的要求。一些影响储能技术规模化应用的技术瓶颈还有待突破,包括储能技术的关键材料、核心技术、效率、安全性、可靠性、循环使用寿命和动态响应等,以及与关键技术、能源效率以及应用场合密切联系的投资和维护成本。短时期内还将存在“多种储能技术并存,共同发展”的格局。采用混合储能形式,将不同性能的储能系统进行组合,可发挥不同储能技术的优势,以满足功率和能量等多方面的需求。同时,还需要国家对储能技术的研发和储能系统的管理给予政策性的支持,通过储能补贴政策或将其成本计入新能源发电成本来摊平较高的储能成本。

基金项目

本文工作由国家科技部 973 计划(No. 2011CB935900)和国家自然科学基金(No. 21231005)项目资助完成。

参考文献 (References)

- [1] Yu, Y.X. and Luan, W.P. (2009) Smart grid. *Power System and Clean Energy*, **25**, 7-11.
- [2] Chen, S.Y., Song, S.F., Li, L.X. and Shen, J. (2009) Survey on smart grid technology. *Power System Technology*, **33**, 1-7.
- [3] Zhang, W.L., Qiu, M. and Lai, X.K. (2008) Application of energy storage technologies in power grids. *Power System Technology*, **32**, 1-9.
- [4] Luo, X., Wang, J.H. and Ma, Z. (2014) Overview of energy storage technologies and their application prospects in smart grid. *Smart Grid*, **2**, 1-12.
- [5] 张静, 岳芬, 俞振华, 来小康, 张华民, 陈海生, 王子冬, 中关村储能产业技术联盟成员 (2014) 2013 年储能政策和产业盘点. *中国能源报*.
- [6] Tao, Z.L. and Chen, J. (2012) Secondary battery systems for energy storage in smart grids. *Chinese Science Bulletin*, **57**, 2545-2560. <http://dx.doi.org/10.1360/972011-2190>
- [7] Li, J.L. (2012) Study on control methods battery energy storage technology. *Power System and Clean Energy*, **28**, 61-65.
- [8] Liu, Z.H., Zhang, H.M., Gao, S.J., Ma, X.K. and Liu, Y.F. (2014) The world's largest all-vanadium redox flow battery energy storage system for a wind farm. *Energy Storage Science and Technology*, **3**, 71-77.
- [9] Ding, M., Chen, Z., Su, J.H., Chen, Z., Wu, J.F. and Zhu, C.Z. (2013) An overview of battery energy storage system for renewable energy generation. *Automation of Electric Power Systems*, **37**, 19-25.
- [10] Wang, C.S., Wu, Z. and Li, P. (2014) Prospects and challenges of distributed electricity storage technology. *Automation of Electric Power Systems*, **38**, 1-8.
- [11] Wang, C.S., Wu, Z. and Li, P. (2014) Research on key technologies of microgrid. *Transactions of China Electrotechnical Society*, **29**, 1-12.
- [12] Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems (2013) An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems. *Automation of Electric Power Systems*, **37**, 3-8.