



高比例新能源电力系统中储能技术的优势与其面临的挑战

文/范 辉 何省宜 傅志映
中国电建集团甘肃能源投资有限公司

随着我国社会经济和电力系统的快速发展，新能源的高效利用和智能电网的发展成为了当前电力系统发展的阶段性目标，而储能技术是实现该目标的必要保障和手段。从储能的技术发展、经济效益、应用场景以及面临的挑战，考虑不同储能系统对整个电力系统网络的影响，对不同的储能系统进行了介绍与研究。

随着我国社会经济和电力技术的不断发展，电力系统在趋于成熟的同时也面临着更多的挑战。目前，火力发电份额仍然占世界上大多数国家年发电量的60%~80%，其中维护成本过高及环境问题是最大的挑战。因此，各地区大多数电力部门都试图将新能源并入电网，以实现可持续、更环保和更可靠运行的电力系统。在国家政策的引导下，智能电网的快速出现和发展，极大地推动了新能源系统和储能系统的研究与改进工作。储能系统技术的发展，将提高新能源在电力系统中的比例，这对改善电能质量，提高电网能量效率，降低发电系统的建设成本，提供安全、可靠和易获取的电能，减少维

护与运行成本都起着至关重要的作用。

随着电力系统向智能电网系统的迈进，新能源已成为电力系统中的一个重要组成部分，储能技术的发展和已彰显出对全球电力系统的巨大潜力和深远影响。在过去的数十年中，科研人员通过无数的研究与合作，使储能技术得到了巨大的发展与进步。这些进步成果使得储能系统从早些年的小型储能系统向应用更为广泛的大型储能系统转变，极大地提高了新能源在电力系统中的比例。

当前，我国政府正引领储能技术的发展，大力推进政策的发布、学术的研究及实验项目的展开；推进储能系统在商业和日常生活中的应用。经过数

十年不断地发展，我国储能技术已达到先进国家的科研水平。其中包括流体储能、高效电池、超级电容器、飞轮储能、压缩空气储能、抽水蓄能、铅酸电池及电磁储能等。除上述储能技术之外，随着材料科学的迅速发展，基于石墨烯材料的新型储能技术也得到了不少科研人员的青睐，并有望在将来代替部分效率转换较低的储能方式。

目前，全球已有数百个兆瓦级别的储能实验项目记录在案。这些实验项目包括储能技术在分布式发电、微电网、新能源集成、输电、配电、用电、调压和调频中的应用。因此，对现阶段储能技术深入了解，评估、分析其优势、面临的挑战和未来的应用前景将成为该领域内科研的中心目标之一。本文对已有的储能技术的优点、挑战、预期目标以及发展前景进行综合研究、评估，为储能技术在电力市场的发展方向提供有用信息，并为储能技术的政策决策提供参考意见。

储能技术的分类

储能（ES）是指通过能量转换模块将电源或电网中的电能经过某种介质转换为另一种形式的能量储存起来，并在需要时再释放出来的过程。这种能量转换再释放的过程，使储能系统（ESS）的总效率降低，因此有必要在不同的应用场景使用不同的储能方式达到需求的效益。根据现在已有的储能技术方案，大致可分为四类储能方式，即机械储能、热能储能、化学储能和电能储能，如图1所示。

1. 机械储能

机械储能可进一步分为势能储能（抽水蓄能、压缩空气储能）和动能储能（飞轮储能）。其中，抽水蓄能（PHS）技术是发展最为成熟的技术。它在用电低谷期，通过水泵将电能转化为水的势能，

并在用电高峰期释放。具有使用寿命长、容量大和单位成本低的特点。抽水蓄能技术的设计和建造最复杂、成本最昂贵，且受到地理位置及环境气候等因素的影响。飞轮储能是通过电动机将电能转换为飞轮的动能，并在需要时用飞轮拖动电动机发电，其优点是响应速度快、维护成本低、寿命长、效率高、易施工和更稳定等。但它的放电速度过快、能量密度低，仅适合短期使用。相比之下，压缩空气储能（CAFS）是将电能通过气体压缩机压缩空气，并在需要时用高密度的空气推动电动机发电或提供热或冷，具有更长的使用寿命，但技术要求复杂，效率低，对地理位置的要求高，使得该储能技术的应用受限。

2. 热能储能

热能储能（TES）是通过加热或冷却存储介质，并在需要时通过介质释放或吸收热量达到储能效果的过程，其存储时间可达数月。

热能储能大致分为潜热储能和显热储能。潜热储能是基于相变材料（PCM）的原理，通过使介质发生相变而吸收或释放热量，但温度保持在一定范围不变，这类材料被认为是节能环保的最佳绿色载体。显热储能是利用一种蓄热介质（多数为水），通过提高介质的温度实现储能，该过程不改变介质的相态。在一些光伏发电系统中，这种蓄热介质负责提供太阳能光伏停机期间所需的热能或电能。

热能储能的主要优点是储能效率高，可达95%~97%，并且建造该储能系统的成本相对低于每兆瓦常规大型电池储能系统。熔盐作为一种良好的储能介质，国内外都已对熔盐储能技术进行了多项研究，并在一些太阳能热电厂得到集中应用。在意大利、德国等一些技术先进的国家得到商业化开发和应用，但由于所用的材料具有腐蚀性以及熔盐的高凝

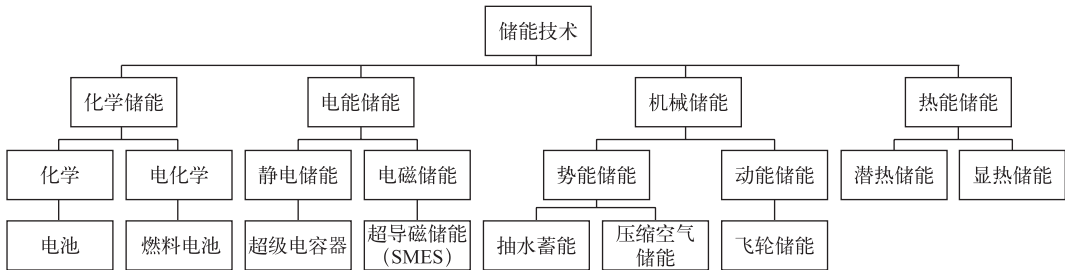


图1 几种储能技术的分类

固温度，该储能技术还未能广泛应用于日常生活。

3. 化学储能

化学储能系统的发展更侧重于电池系统，通过电化学反应与还原过程，使能量在电能和化学能之间相互转换。如氢气和二氧化碳可通过电解生成甲烷，而甲烷相对于其他可燃气体，易保存，燃烧效率高，并且在生成与燃烧过程中不额外增加碳排放。因此，这种化学储能是一种极为环保的储能技术，具有潜在的研究价值，在未来可能推动大型储能系统的研发与制造。

然而，化学储能也有其自身的局限性。如能量转化效率低（40%~50%）、成本高和安全性低等都是亟需解决的核心问题。目前，利用氢气产生电能（氢能储存）的燃料电池已在多个国家得到研究验证，并在电力系统、交通运输和火电等领域得到了应用。它作为一种清洁的可再生能源，可靠地作用于电力系统的备用能源系统中，确保整个电力系统的稳定运行。氢能系统作为基础能源系统大规模应用于工业，将提高整个电力系统的效率与稳定性，降低生产成本，延长生命周期，使新能源在电力系统中的占比提高。

4. 电能储能

电能储能（ESS）是将电网中的电能和低峰期存储，并在高峰期再转换为电能的过程。在这一过程中，通常是在用电低谷期使用新能源发电并存储，在高峰期或高用电成本期间注入存储的电能。电能储能通常应用于交通工具、微电网、能源系统以及从发电、输电、配电到用电的完整的电力系统中。

电能存储系统可分为静电储能系统（超级电容器）和电磁储能系统（超导磁储能）。超级电容器储能具有响应时间快、寿命长、运行和维护成本低、功率输出高及效率高等优势，并且可以在较为苛刻的环境温度中运行。超导磁储能（SMES）主要由电源调节器、超导线圈和冷却系统组成，其能量储存在由超导材料制成的线圈的电磁场中。它是基于超导材料在低温下电阻极低的原理而构建的，其能量转换效率可达90%~95%。

储能技术的比较与评价

1. 技术发展

经过一个多世纪的发展，抽水蓄能（PHS）和

铅酸蓄电池是当今发展最为成熟的储能方式，人们已经能够将其应用于各种工业生产及日常生活中。超导磁储能（SMES）、超级电容器和飞轮储能正处于高速发展的阶段，已经能够应用于较多的工业中，但由于其自身的局限性，仍未能广泛地投入使用。而燃料电池仍有待进一步发展，虽然在理论上得到了各国学者的验证并具有巨大的工业应用价值，但在安全性、应用领域和如何提高效率等方面还留有疑问，尚未能在商业上推广使用。

2. 生产成本

生产成本是储能技术商业化应用前最为重要的考虑因素之一。评估生产成本的方法是测量储能技术的充放电率、生命周期内的成本现值/生命周期内的发电量现值。抽水蓄能由于其容量大、工作时间长和生命周期长等因素，现阶段是度电成本最低的储能方式，但由于其建造周期长、地理环境要求高，总生产成本也相对较高。而铅酸蓄电池，由于制作工艺成熟，且体积小，相对来说是生产成本最低的储能技术，但其生命周期短，且维护成本较高。几种储能技术的相关参数见表1。

表1 几种储能技术的相关参数

储能方式	额定功率/MW	放电时间	储存期	每天自放电	成本/(元/kW·h)
机械储能 (PHS)	100~5 000	1~24 h	数小时~数月	极少	5 000~6 000
化学储能 (铅酸电池)	0~20	数小时内	几分钟~数天	0.1%~0.3%	1 200~2 000
电储能 (SMES)	0.1~10	毫秒~数秒	几分钟~几小时	10%~15%	10 000~100 000
热能储能 (显热储能)	0.001~10	10~15 min	数天~数月	少量	100~500

总体而言，机械储能成本较低。而燃料电池的成本最为昂贵，仍需要一定的深化研究才能更具有商业竞争力。随着技术的突破、工厂选址和生产规模等的不同，每种储能方式的生产成本也会有所改变。

3. 循环效率

循环效率是指能量储存系统的能量使用效率，表示为 $\eta=E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$ 。式中， E_{in} 为电力输入； E_{out} 为电

力输出。根据循环效率，储能技术可分为三大类。

1) 超高效储能。指循环效率大于90%的储能技术，如飞轮储能、超导磁储能、锂离子电池和超级电容器。

2) 高效储能。指循环效率在60%~90%之间的储能技术。如抽水蓄能系统、压缩空气储能系统和电池（非锂离子电池）储能。其中，压缩空气储能因为空气的压缩和膨胀过程中会消耗大量能量，所以效率会低于抽水蓄能系统。

3) 低效储能。指循环效率低于60%的储能技术。如太阳能、氢储能和热能储能。这是在能量转换的过程中由于大量的能量损失造成的。但这类储能方式大多是低污染的，因此具有十分广阔的潜在商业价值。

虽然不少储能方式的循环效率低，但是其初始投入成本也较低。初始成本低、循环效率低的储能方式与初始成本高、循环效率高的储能方式有了竞争的可能。

4. 循环寿命

循环寿命是在特定的应用场景中选择储能方式的重要考虑因素之一。与其他储能技术相比，基于电能储能的储能技术具有更长的循环寿命。寿命最长的是超导磁储能、电容器和超级电容器。抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能和热能储能也具有较长的循环寿命，但是其寿命取决于系统内部各种零部件的使用寿命。而可再生能源燃料电池、铅酸电池等储能方式，由于经常使用各类化学试剂，会发生化学劣化现象，因此其使用寿命远不如其他储能技术，这也是当今重点研究的方向之一。

5. 能量密度和功率密度

功率密度是额定功率/储存设备体积，而能量密度是储存能量/设备体积。设备体积包括储能设备本体、附件、支撑结构和逆变器系统（如有）。

燃料电池和太阳能发电技术尽管循环效率低，但都展现出极高的能量密度（通常为1 000 W·h/kg）。热能储能和压缩空气储能具有中等级别的能量密度。而抽水蓄能、超导磁储能、飞轮储能和超级电容器虽然使用寿命长，循环效率较高，但是其能量密度极低（仅30 W·h/kg）。不过超导磁储能、飞轮储能和超级电容器还具有极高的功率密度，能够应用于具有大放电电流、快速响应和高电能质量要求的工

程中。

6. 环境影响

上述储能技术都对环境有着或多或少的影响。但太阳能发电是完全利用太阳能直接转化为电能，在此过程中，对环境的负面影响几乎为零。而氢能储能若是开发得当，也能够显著减少化石燃料的使用，从而对环境产生积极的影响。

抽水蓄能系统的建造和运行都会对自然环境造成一定的影响。压缩空气储能是基于化石燃料的燃烧，因此其排放物对环境的危害更值得人们关注；电池中的有毒物质一旦没有适当处理，则会对土壤、水源造成长久性的影响；超导磁储能设备的运行会产生高强度磁场，对人类和动植物会造成身体和心理上的危害。

储能系统在电力系统中的优势

储能系统的集成对电力系统的好处大致分为技术收益和经济效益。其中，在世界范围内，几乎一半的储能装置用于新能源并网系统中；其余的储能装置平均分布于分布式发电和微电网、调频、调压系统以及输电、配电系统。

1. 技术收益

1) 储能系统在新能源并网、负荷均衡、调峰和电网调度等方面发挥重要作用，促进了智能电网的发展和系统的集成。

2) 储能系统将缓解输电线路阻塞问题，提高电网服务系统的可靠性。

3) 储能系统有潜力促进新能源的使用，如热能的生产和运输，提高新能源在电力系统中的占比。

4) 储能系统的输出功率可迅速改变，并作为变电站和输电线路的备用电源，为电网提供黑启动（无源启动）。

储能系统的上述技术收益，使得公共事业和独立运营商可以对发电、输电和配电线路进行改进和重组，从而降低生产和生活成本。

2. 经济效益

1) 储能系统将从根本上降低用户电价和输电阻塞费用，使政府、用户及运营商们同时受益。

2) 一些情况下，储能系统的组件成本要低于安装同等电力设备的平均成本。

3) 有助于稳定市场电价，减少化石燃料价格变

化对电力市场的影响。同时减少温室气体及其他有害气体排放，更快实现碳中和。

4) 提供更多的就业机会，促进经济增长。

5) 储能技术将促进新能源错峰发电并在高峰期有效投入使用，为新能源发电和储能技术吸引更多的投资。

6) 储能技术将促进各项辅助功能的普及性，降低发电成本和其他相关成本。

储能系统在电力系统中面临的挑战

随着国家电力系统迈向智能电网系统，储能技术在新能源发电、分布式发电、电网集成、微电网、输电、配电和调压、调频等辅助功能方面展现出巨大的潜力。因此，大型储能系统的发展和投入使用已成为必然，但该技术现阶段仍面临技术和经济挑战。

1. 技术挑战

储能技术的发展需要更尖端的科研水平、更经济高效的技术手段、更长的生命周期和更可靠安全的储能方式。当前的研究应致力于多应用场景的储能模拟和操作实验，这有助于将储能技术从理论、实验到应用的研发项目和总体评估进行整合，从而促进该技术的商业化进程。在该过程中，需要建立功能全面、职责清晰的专业机构和科研小组，制定透明、开放和完善的储能标准，为储能技术的进一步研发、建造和维护运营提供坚实的基础。

2. 经济挑战

目前，世界各地的储能行业仍面临着缺乏政策导向、整合价值不明、成本高和低市场竞争力等问题。因此，未来需要考虑两个关键的问题：①有必要在用户、研究人员及各类社会人员的参与下，阐明储能系统的优势，引导市场接受更新、更高效的储能技术，为工业生产及人们的日常生活带来更多便利；②需要对储能系统的维护、运营进行大量的研究观察，创造一个可靠的发展模式，实现储能技术的商业化运营。

结束语

分别对机械储能、电能储能、热能储能和化学储能等储能技术的原理进行分析与总结，重点评估了各储能技术在电力系统中的应用优势及面临的挑战。阐述了加快储能系统的研发与应用所带来的收

益与问题以及未来新能源储能系统的开发潜能。

储能系统的发展仍面临着一些技术与经济挑战。如何降低生产、维护和运行成本及提高系统的安全性，如何稳定市场波动、建立适当的政策及实现商业化运营等，都是亟需解决的问题。因此未来很长一段时期内，储能技术的研究与应用一定会是我国科研的焦点之一，从根本问题出发，促进储能技术的发展，从而推动国民经济的迅速发展，为社会稳定发展、人民安居乐业奠定坚实的基础。EA

参考文献

- [1] 罗晓乐, 宋洋, 徐翔, 等. 计及新能源消纳的储能容量优化配置研究[J]. 电气开关, 2022, 60(2): 19-24, 29.
- [2] 徐涛, 董元球, 杨洋. 新能源消纳能力分级评估应用分析[J]. 电气开关, 2022, 60(2): 1-3.
- [3] 丛晶, 宋坤, 鲁海威, 等. 新能源电力系统中储能技术研究综述[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(3): 53-59.
- [4] Y Liangzhong, Y Bo, C Hongfen, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power system[J]. Journal of Modern Power systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [5] 王富强, 王汉斌, 武明鑫, 等. 压缩空气储能技术与发展[J]. 水力发电, 2022, 68(10): 1-6.
- [6] 裴金鑫, 姚骏, 黄森, 等. 电网短路故障下新能源并网变换器的暂态同步机制及其自适应稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5922-5934.
- [7] LUO X, WANG J, DOONER M. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137(9): 511-536.
- [8] 黎冲, 王成辉, 王高, 等. 电化学储能商业化及应用现状分析[J]. 电气应用, 2021, 40(7): 15-22.
- [9] 裴春兴, 王蓝, 王聪聪, 等. 电力系统储能应用场景研究综述[J]. 电气应用, 2022, 41(9): 1-8.