

大规模电力储能技术的特性与比较

俞恩科¹, 陈梁金²

(1. 舟山电力局, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江省电力试验研究院, 杭州 310014)

摘要: 介绍储能技术分类及其在电力系统中的应用, 对抽水蓄能、压缩空气、飞轮、超导、超级电容器、二次电池、液流电池和钠硫电池储能技术的特性进行了分析和比较, 阐述了各种储能技术的适用领域。

关键词: 混合储能系统; 可再生能源; 二次电池; 能量型储能; 功率型储能; 协调控制

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1007-1881(2011)12-0004-05

Characteristics and Comparison of Large-scale Electric Energy Storage Technologies

YU En-ke¹, CHEN Liang-jin²

(1. Zhoushan Electric Power Bureau, Zhoushan Zhejiang 316021, China;

2. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The classification of energy storage technologies and its application in the electric power system are introduced. And the characteristics of energy storage technologies involving pumped hydroelectric storage, compressed air, flywheel, superconducting magnet, supercapacitors, secondary batteries, redox flow batteries, sodium-sulphur batteries are analyzed and compared. The applicable fields of various storage technologies are elaborated.

Key words: hybrid energy storage system; renewable energy; secondary batteries; energy-usage energy storage; power-usage energy storage; coordinated control

0 引言

近年来, 储能技术的研究和发展受到了各国的重视, 欧盟的“框架计划”、日本的“新阳光计划”以及美国的“DOE 项目计划”等都将储能技术列为研究重点^[1]。2010年, 在美国储能修订法案(S.3617)、加州储能法案(AB2514)以及奥巴马颁布的新能源政策中都要求所有新能源项目必须配备储能技术方案, 这些政策和措施成为储能技术发展的重要里程碑。

随着智能电网的稳步推进、间歇性可再生能源的大规模入网以及地区峰值负荷的增长, 各种应用问题也随之出现, 而储能技术的应用将为解决这些问题提供非常有效的途径。为充分发挥储

能技术在改善电能质量、平衡电力负荷和削峰填谷等方面的作用, 研究各种常见储能技术的基本特性并进行相关技术经济性比较显得非常重要。

1 储能分类及应用

目前, 储能技术可分为以下几类:

(1)按照技术类型划分, 储能系统分为化学储能(如铅酸电池、液流电池、钠硫电池和锂电池)、电磁储能(如超级电容器储能、超导磁储能)、物理储能(如抽水储能、飞轮储能、压缩空气储能)和相变储能(如冰蓄冷)。

(2)按照时间划分, 可分为短时储能(放电时间为秒级到分钟级)、中期储能(数分钟到数小时)和长期储能(数小时到数天)^[2]。

(3)按照功能划分,可分为能量型储能(Energy-usage energy storage, EES)和功率型储能(Power-usage energy storage, PES)^[3]两种。能量型储能以高比能量为特点,主要用于高能量输入、输出场合;功率型储能以高比功率为特点,主要用于瞬间高功率输入、输出场合。能量型储能装置放电时间相对较慢且经历时间较长(如数十分钟到数小时),功率型储能则以高放电率快速放电(如数秒到数分钟)。

储能技术在电力系统中的应用^[4]见表1。

2 储能技术基本特性

由于储能技术的物理结构、化学组成、能量密度、功率密度、电压、电流输出特性以及能量转换接口均不相同,导致储能机理也不同,因此有必要对储能基本特性进行分析。储能技术的基本特性^[5-7]主要包括存储容量、能量转换效率、能量密度和功率密度、自放电、放电时间、循环寿命、系统成本、环境影响等。

2.1 存储容量

存储容量(E_s)即储能系统充电后所具有的有效能量,通常比实际使用能量(E_u)大。由于实际使用能量通常受放电深度(DoD)限制,在快速充放电时,储能系统效率下降,加上系统自放电因素影响,其实际使用能量比存储容量要小。

2.2 能量转换效率

能量转换效率为储能系统放电后释放出的能量与初始存储能量之间的比值,即 $\eta = E_u/E_s$ 。要使储能系统高效运行,必须有较高的转换效率。

2.3 能量密度与功率密度

能量密度(E/M)是指单位质量或体积空间中物质所具有的有效储存能量,又称比能量,包括质量能量密度(质量比能量)与体积能量密度(体积比能量),常用单位为Wh/kg或Wh/L。功率密度(P/M)是指单位质量或体积空间中物质所具有的有效存储功率,又名比功率,包括质量比功

率和体积比功率,常用单位为W/kg或W/L。

一般来说,比能量高的储能系统(能量型储能)其比功率不会太高;同样,当储能系统的比功率较高时(功率型储能),其比能量不一定会很高,许多蓄电池储能就是如此。

2.4 自放电率

大储能系统闲置不用时,其初始存储能量会自动耗散,因为储能系统的原材料中会有少量杂质,所以不可避免存在自放电现象。自放电大小即自放电率(常以%/日,%/月等表示),与制造工艺、材料及存储条件有关,如电池自放电率与正极材料在电解液中的溶解性和其受热后的不稳定性(易自我分解)有关,可充电电池的自放电率远比一次性电池高,电池类型不同其自放电率也不一样。

2.5 放电时间

放电时间即储能系统最大功率运行时的持续放电时间,取决于系统放电深度、运行条件以及是否为恒功率放电等。

2.6 循环寿命

储能系统经历一次充电和放电,称为一次循环或一个周期。在一定放电条件下,储能系统工作至某一容量规定值之前,系统所能承受的循环次数或年限,称为循环寿命。影响循环寿命的因素是储能系统的性能和技术维护工作的质量。后者由于工作过程(如使用模式、充放电模式、失效模式和环境情况等)不能达到理想的状况,会导致装置寿命进一步缩短。好的循环性能是储能系统长期经济运行的重要保障。

2.7 其他特性

除此之外,储能技术还有成熟度、成本、系统维护量、放电频率、环境影响、与现有基础设施的兼容性、可移植性、安全性和可靠性等特性。

3 储能技术主要特性比较

本文对以下几种主要储能技术进行技术特性

表1 储能技术在电力系统中的应用

应用范围	发电系统	输电系统	辅助供电功能
主要作用	减少对系统装机容量要求,提高发电设备利用率	延缓输电投资、提高资产利用率	降低辅助设备成本
应用实例	负荷调节、能量管理、峰值发电	改善电能质量、利用可再生能源	旋转备用、长期系统容量备用、频率调节控制、不间断电源

比较: 抽水蓄能(PHS)、压缩空气储能(CAES)、超导磁储能(SMES)、飞轮储能(FLY)、超级电容器储能、铅酸电池(Lead-acid)、锂电池(Li-ion)、镍镉电池(NiCd)、液流电池(VRB, ZnBr 等)、钠硫电池(NaS)储能等。

3.1 存储容量与放电时间

根据储能存储容量的不同, 其应用领域可分为: 电能质量改善和不停电电源、容量备用电源和能量管理。图 1 给出了多种储能技术的容量-放电时间比较。

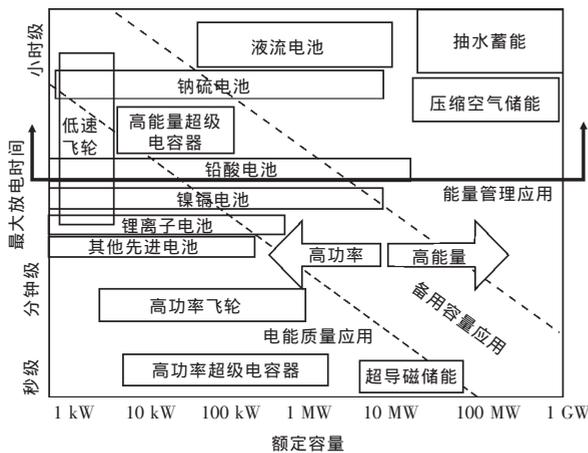


图 1 储能系统容量-放电时间比较

从图中可以看出, 各种二次电池(镍氢电池、锂离子电池)、超级电容器、飞轮储能等可用于电能质量改善和不间断电源, 钠硫电池、超导磁储能、铅酸电池、液流电池可用于容量备用电源, 抽水蓄能、压缩空气、钠硫电池、铅酸电池、氧化还原液流电池储能可用于能量管理。

3.2 能量转换效率与循环寿命

3.2.1 能量转换效率^[8]

能量转换效率是基于某一具体储能应用时的 1 个或多个充放电循环周期的, 1 个完整的充放电循环周期的能流如图 2 所示。

图 2 中, T 为循环周期, η_{out} 为电网输入 AC 侧到储能系统侧的转换效率, P_{id1} 为 E_s 储能系统侧到输出 AC 侧的转换效率, 为存储过程中所消耗的各种功率, 如铅酸电池、超级电容器等的自放电损耗、钠硫电池运行达到 300℃ 以上所需的保温耗能损耗、超导磁储能低温环境所需的制冷损耗等。由于 P_{id1} 在充电或放电阶段比 E_s 小得多, 因此可视其为常量。图中 AC-AC 侧能量循环效

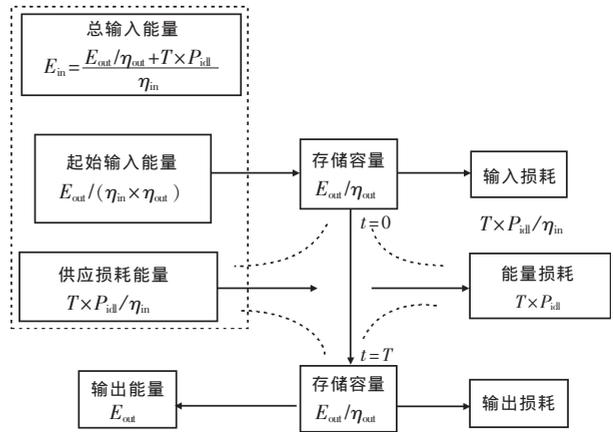


图 2 1 个充放电周期的能流

率可以表示为:

$$\eta_c = \frac{\eta_{in}}{\frac{1}{\eta_{out}} + \frac{T}{\tau_s} \times \frac{E_s}{E_{out}}}$$

式中: $\tau_s = E_s / P_{id1}$, 而 T / τ_s 可以忽略不计, 因此 η_c 近似为 $\eta_{in} \times \eta_{out}$ 。

各种储能技术的循环效率 η_c 与周期 T 之间的关系如图 3 所示。效率曲线下降与储能系统损耗 P_{id1} 有直接关系。假设铅酸电池每天自放电率为 2%, 钠硫电池工作温度在 300℃ 以上, 电容器在 12 h 内的自放电率为 20%。由于钠硫电池维持其工作温度需消耗额外能量, 当输入能量相同且储能周期达到数天时, 钠硫电池效率将低于其他二次电池。

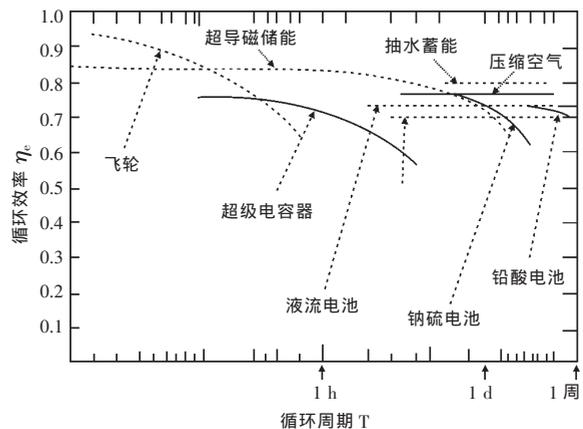


图 3 循环效率与周期关系

大多数飞轮储能系统都是由一个圆柱形旋转质量块和通过磁悬浮轴承构成的支撑机构组成, 安装并运行于真空度较高的环境中, 以减少轴承

摩擦损耗与风阻损耗(约为其 P_{id} 的 87%)。另外,飞轮储能在充放电阶段经历了两次功率变换(AC-DC-AC),因此,随着储能周期延续,其储能效率逐渐降低。超级电容器效率较低的原因主要与其自放电和输入电压随存储容量($E_s=1/2 \cdot C \cdot U^2$)变化有关。

3.2.2 循环寿命

几种储能系统的寿命统计见表 2。从表中可以看出,二次电池循环寿命一般不高,铅酸电池在放电深度为 80% 时的循环次数约为 2 000 次,如果深度放电,次数将远低于此值。其他化学储能如 NaS, VRB 和 ZnBr 电池等,使用寿命均比铅酸蓄电池长,因而将在未来高效大容量电池储能中广泛应用,特别是 VRB 液流电池,其寿命在一万次以上,目前已有实际应用。

表 2 电力储能系统寿命

名称	年数	次数
抽水蓄能	30~60	10 000~30 000
压缩空气	20~40	8 000~12 000
铅酸电池	3~20	<2 000
镍镉电池	15~20	<3 000
钠硫电池	10~15	2 500~5 000
锂离子电池	5~15	1 000~10 000
钒电池	5~10	>12 000
锌溴电池	5~10	2 000
超导磁储能	>20	>100 000
飞轮	15~20	>21 000
超级电容器	8~20	>50 000

3.3 体积比能量与质量比能量

图 4 给出了各种储能技术的能量密度^[7]。从图中可以看到,钠硫电池与锂离子电池的能量密度均较高,因此在相同能量和功率情况下,其储能装置的质量和体积空间最小;镍镉电池、液流电池、铅酸电池和超级电容器能量密度依次降低;压缩空气和飞轮储能的能量密度则非常小。

3.4 成本及经济性比较

对储能系统的总成本进行比较非常困难,因为它取决于许多因素^[7],包括:各种成本正在逐渐降低;成本受储能应用对象、容量大小、储能效率和使用寿命影响;运行和维护费用不明了;回收处理成本不是非常清楚;等等。但为了对这些储能技术的成本有所了解,可对这些技术的主要成本即资金成本进行合理比较。

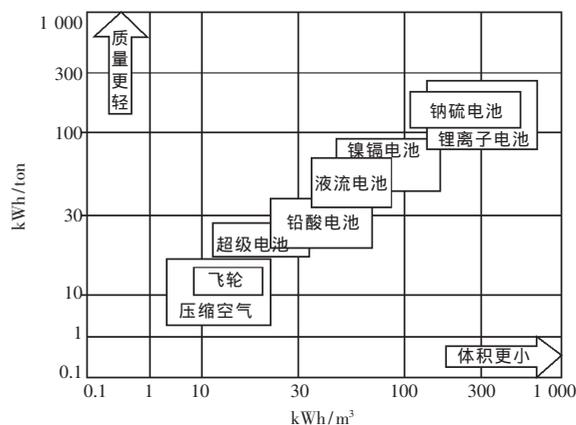


图 4 能量密度(体积与质量能量密度)

储能系统的成本主要包括资金成本、运行与维护成本及其他成本,其中,资金成本是储能系统成本的一个重要经济性参数,占系统总成本比例最大。其成本主要包括:储能辅助装置成本、功率转换/调节系统成本、存储装置成本 3 部分。

目前,铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池、液流电池的成本比较高,随着未来储能技术的大规模使用,其成本有望逐渐降低。

3.5 比较小结

大容量、高密度、高效率、低成本、使用寿命长的储能技术无疑是最理想的,但至今还没有一种储能技术能完全满足这些条件,因此有必要为各种储能技术选择合适的应用领域。

压缩空气储能成本低、寿命长,安全系数高,但由于受地形限制,需要将压缩空气储存在合适的地下矿井或溶岩下的洞穴中,因此常用于系统调峰。抽水蓄能与压缩空气类似,其放电时间可以从几小时到几天,但同样会受地形制约,建设周期也较长,还会带来一定的生态问题。

飞轮、超级电容器和超导磁储能的循环使用寿命和效率、功率和响应时间都很好,无污染、维护较简单,但比能量较低,属于典型的功率型储能,可短时间大功率快速放电,用于频率调节、大功率负载平滑、输/配电网电压支撑和大功率补偿等。

二次电池(铅酸、锂离子、镍镉电池等)成本较高且循环使用寿命短,为了减少这些缺陷的影响,有必要大力发展电池回收技术。电池储能可以同时向系统提供有功和无功支撑,因此对于复杂电力系统的控制具有非常重要的作用。铅酸蓄

电池在高温下寿命缩短, 具有较低的比能量和比功率, 且存在一定的环境污染, 但是成本低、可靠性好、技术成熟, 因此广泛用于不间断电源、电能质量和频率控制等。镍镉电池与铅酸电池相似, 同样存在重金属污染。锂离子效率高、比能量与比功率高、自放电小、环境友好, 但成本较高, 因而近期很难在电力系统中大规模应用。

新兴化学储能如液流电池和钠硫电池是目前最适合大规模发展的电力化学储能技术。全钒液流电池循环寿命长(大于 12 000 次)、能量转换效率较高, 选址和设计灵活, 安全环保, 但比能量和比功率偏低, 因此适用于可再生能源储能和调峰电源及应急电源。钠硫电池储能效率高(约 89%), 比能量密度高, 约为铅酸电池的 3~4 倍, 可同时用于电能质量调节和负荷的削峰填谷, 是典型的能量型与功率型储能。

间歇性可再生能源的大规模利用促进了储能技术的研究与发展, 因此, 选择合适的储能技术已成为关键问题。在具有高渗透率可再生能源、电网较弱的偏远地区, 选择成熟的储能技术较好; 而对于可以充分利用可再生能源及延缓投资建设的坚强电网, 应该选择最先进的储能技术。

4 结语

本文介绍了目前常见的储能技术分类及应用, 对它们的基本特性进行了详细的技术经济性比较分析。目前对储能技术的研究大多针对单一储能装置的研发和充放电控制策略研究, 在多种储能系统控制方面也只是围绕简单的储能系统组合方式(如蓄电池与超级电容器组合)开展研究, 对在多种储能系统混合存在时如何实现它们之间的协调与互补优化控制的研究则更少。鉴于各种储能技术的优点及发展前景, 储能技术的研究具有很大的空间。在实际应用时, 必须根据实际应用要求, 将不同的储能技术结合使用, 充分发挥各种储能技术的优点, 使其优势互补, 从而提高储能系统的灵活实用性和技术经济性。因此, 未

来多元混合储能系统(功率型与能量型储能系统)及其互补优化控制将成为重要的研究方向。

参考文献:

- [1] 张华民. 高效大规模化学储能技术研究开发现状及展望[J]. 电源技术, 2007, 31(8):587-591.
- [2] KUSKO A, DEDAD J. Short-term, long-term, energy storage methods for standby electric power systems[C]. Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, Natick, MA, USA, Vol4, 2005, 2672-2678.
- [3] 王虹富. 并网风电场的有功功率补偿与稳定性控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [4] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4):1-8.
- [5] IBRAHIM H, ILINCA A, PERRON J. Energy storage systems-characteristics and comparisons[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008, 12(5):1221-1250.
- [6] IBRAHIM H, ILINCA A, PERRON J. Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance index[C]. Electrical power conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada 2007:393-398.
- [7] NOURAI A. Large-scale electricity storage technologies for energy management[J]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 2002, 1:310-315.
- [8] KONDOH J, ISHII I, YAMAGUCHI H, et al. Electrical energy storage systems for energy networks[J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(17):1863-1874.
- [9] IOANNIS HADJIPASCHALIS, ANDREAS POUILLIKKAS, VENIZELOS EFTHIMIOU. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6-7):1513-1522.
- [10] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12):85-89.

收稿日期: 2011-06-01

作者简介: 俞恩科(1966-), 男, 浙江普陀人, 工程师, 长期从事输配电网运行检修、管理工作。

(本文编辑: 龚 皓)

建设智能电网 优化能源结构