超级电容器的应用与发展

胡毅，陈轩恕，杜砚，尹婷

(国网武汉高压研究院，湖北省武汉市430074)

摘要：超级电容器是介于传统电容器和蓄电池之间的一种新型储能装置，它具有功率密度大、容量大、使用寿命长、免维护、经济环保等优点。文章介绍了超级电容器的原理、主要性能指标、特点及国内外发展和应用状况；归纳了超级电容器在电力系统中的若干具体应用，指出了使用中应注意的问题及其解决方法，以及今后的研究方向。

1概述

超级电容器是介于传统电容器和充电电池之间的一种新型储能装置，其容量可达几百至上千法拉。与传统电容器相比，它具有较大的容量、较高的能量、较宽的工作温度范围和极长的使用寿命；而与蓄电池相比，它又具有较高的比功率，且对环境无污染。因此可以说，超级电容器是一种高效、实用、环保的能量存储装置。几种能量存储装置的性能比较如表1所示。

表 1　能量存储装置性能比较

元器件	比能量 /Wh·kg^{-1}	比功率 /W·kg^{-1}	充放电次数 /次
普通电容器	<0.2	10^4～10^6	>10^6
超级电容器	0.2～20.0	10^2～10^4	>10^5
充电电池	20～200	<500	<10^4

超级电容器的发展始于20世纪60年代，起先被认为是一种低功率、低能量、长使用寿命的器件。但到了20世纪90年代，由于混合电动汽车的兴起，超级电容器才受到广泛的关注并开始迅速发展起来。

现今，大功率的超级电容器被视作一种大功率物理二次电源，各发达国家都把对超级电容器的研究列为国家重点战略研究项目。目前，超级电容器在电力系统中的应用越来越受到关注，如基于双电层电容储能的静止同步补偿器和动态电压补偿器等，国内外对他的研究和应用正在如火如荼地进行。此外，超级电容器还活跃在电动汽车、消费类电子电源、军事、工业等高峰值功率场合。超级电容器主要应用领域如表2[1]所列。

2超级电容器的工作原理及发展状况

2.1工作原理和性能指标

一般认为超级电容器包括双电层电容器和电化学电容器两大类 [2]。

表 2 超级电容器主要应用领域

应用领域	典型应用	性能要求	RC时间常数
电力系统	静止同步补偿器、动态电压补偿器、分布式发电系统	高功率、高电压、可靠	ms～s
记忆贮备	消费电器、计算机、通信	低功率、低电压	s～min～h
电动车、负载调节		高功率、高电压	<2 min
空间	能量束	高功率、高电压、可靠	<5 s
军事	电子枪、SDI、电子辅助装置、消声装置	可靠	ms～s
工业	工厂自动化、遥控		<1 s
汽车辅助装置	催化预热器、用回热器刹车、冷起动	中功率、高电压	s

2.1.1双电层电容器

早在1897年，德国人Helmholtz就提出了基于超级电容器的双电层理论。当金属插入电解液中时，金属表面上的净电荷将从溶液中吸引部分不规则分布的带异种电荷的离子，使它们在电极-溶液界面的溶液一侧离电极一定距离处排成一排，形成一个电荷数量与电极表面剩余电荷数量相等而符号相反的界面层。该界面由两个电荷层组成，一层在电极上，一层在溶液中，因此称作双电层。由于界面上存在一个位垒，因而两层电荷都不能越过边界而中和，按照电容器原理而形成一平板电容器[3-4]。由于其距离非常小，一般在0.5nm以下[5]
，加之采用特殊电极材料后使其表面积成万倍地增加，从而产生了极大的电容量。

2.1.2电化学电容器

电化学电容器按电极材料的不同可分为金属氧化物电化学电容器和导电性高分子聚合物电化学电容器，即法拉第准电容。对于电化学电容器，其存储电荷的过程不仅包括双电层上的存储，而且包括电解液中离子在电极活性物质中由于氧化还原反应导致的电荷在电极中的储存[6]
。与双电层超级电容器的静电容量相比，相同表面积下的电化学电容器的容量要大10～100倍[7]。

目前，对超级电容器性能描述的指标有：

(1)额定容量。指按规定的恒定电流(如1000F以上的超级电容器规定的充电电流为100A，200F以下的为3A)充电到额定电压后保持2～3min，在规定的恒定电流放电条件下放电到端电压为零所需的时间与电流的乘积再除以额定电压值，单位为法拉，F。

(2)额定电压。即可以使用的最高安全端电压。此外还有浪涌电压，通常为额定电压的105%；击穿电压，其值远高于额定电压，约为额定电压的1.5～3倍，单位为伏特(V)。

(3)额定电流。指5s内放电到额定电压一半的电流，单位为安培(A)。

(4)最大存储能量。指额定电压下放电到零所释放的能量，单位为焦耳(J)或瓦时(Wh)。

(5)能量密度，也称比能量。指单位质量或单位体积的电容器所给出的能量，单位为Wh/kg或Wh/L。

(6)功率密度，也称比功率。指单位质量或单位体积的超级电容器在匹配负荷下产生电/热效应各半时的放电功率。它表征超级电容器所能承受电流的能力，单位为kW/kg或kW/L。

(7)等效串联电阻(ESR)。其
值与超级电容器电解液和电极材料、制备工艺等因素有关[8]
。通常交流ESR比直流ESR小，且随温度上升而减小。单位为欧姆(Ω)。

(8)漏电流。指超级电容器保持静态储能状态时，内部等效并联阻抗导致的静态损耗，通常为加额定电压72h后测得的电流[9]，单位安培(A)。

(9)使用寿命。是指超级电容器的电容量低于额定容量的20%或ESR增大到额定值的1.5倍时的时间长度。因为此时可判断为其寿命终了。

(10)循环寿命。超级电容器经历1次充电和放电，称为1次循环或叫1个周期。超级电容器的循环寿命很长，可达10万次以上。

2.2国内外发展现状

在超级电容器的研制上，目前主要倾向于液体电解质双电层电容器和复合电极材料/导电聚合物电化学超级电容器。国外超级电容器的发展情况如表3所示[10]。

表 3　国外超级电容器技术现状

公司名称	国家	技术基础	电解质	结构	规格
Powerstor	美国	凝胶碳	有机	卷绕式	3～5 V，7.5 F
Skeleton	美国	纳米碳	有机	预烧结碳-金属复合物	3～5 V，250 F
Maxwell	美国	复合碳纤维	有机	铝箔、碳布	3 V，1 000～2 700 F
Superfarad	瑞典	复合碳纤维	有机	碳布 +粘合剂、多单元	40 V，250 F
Cap-xx	澳大利亚	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒 +粘合剂	3 V，120 F
ELIT	俄罗斯	复合碳颗粒	硫酸	双极式、多单元	450 V，0.5 F
NEC	日本	复合碳颗粒	水系	碳布 +粘合剂、多单元	5～11 V，1～2 F
Panasonic	日本	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒 +粘合剂	3 V，800～2 000 F
SAFT	法国	复合碳颗粒	有机	卷绕式、碳颗粒 +粘合剂	3 V，130 F
Los Alamos Lab	美国	导电聚合物薄膜	有机	单一单元、导聚合物薄膜 PFPT+碳纸	2.8 V，0.8 F
ESMA	俄罗斯	混合材料	KOH	多单元、碳 +氧化镍	1.7 V，50 000 F
Evans	美国	混合材料	硫酸	单一单元、氧化钌 +锂箔	28 V，0.02 F
Pinnacle	美国	混合金属氧化物	硫酸	双极式、多单元、氧化钌 +锂箔	15 V，125 F
USAmv	美国	混合金属氧化物	硫酸	双极式、多单元、含水氧化钌	5 V，1 F

在超级电容器的产业化上，最早是1987年松下/三菱与1980年NEC/Tokin的产品。这些电容器标称电压为2.3～6V，电容从10-2F至几F，年产量数百万只。20世纪90年代，俄罗斯Econd公司和ELIT生产了SC牌电化学电容器，其标称电压为12～450V，电容从1F至几百F，适合于需要大功率启动动力的场合。如今，日本松下、EPCOS、NEC，美国Maxwell、Power
stor、Evans，法国S
AFT，澳大利亚Cap-
xx，韩国NESS等公司在超级电容器方面的研究均非常活跃[11-12]
。总的来说，当前美国、日本、俄罗斯的产品几乎占据了整个超级电容器市场，实现产业化的超级电容器基本上都是双电层电容器。一些双电层电容器产品的部分性能参数列于表4。

表 4　双电层超级电容器产品的部分性能参数

公司名称	电极材料	电解液	能量密度 /Wh·kg^{-1}	功率密度 /W·kg^{-1}
FY	碳	H_2SO_4	0.33	—
FE	碳	H_2SO_4	0.01	—
Panasonic	碳	有机溶液	2.2	400
Evans	碳	H_2SO_4	0.2	—
Maxwell-Auburn	复合碳 /金属	KOH	1.2	800
Maxwell-Auburn	复合碳 /金属	有机溶液	7	2 000
Livemore National Laboratory	碳 (气凝胶)	KOH	1	—
Sandia National Laboratory	碳 (合成)	水溶液	1.4	1 000

在我国，北京有色金属研究总院、锦州电力电容器有限责任公司、北京科技大学、北京化工大学、北京理工大学、北京金正平公司、解放军防化院、哈尔滨巨容公司、上海奥威公司等正在开展超级电容器的研究。2005年，由中国科学院电工所承担的“863”项目“可再生能源发电用超级电容器储能系统关键技术研究”通过专家验收。该项目完成了用于光伏发电系统的300Wh/1kW超级电容器储能系统的研究开发工作。另外，华北电力大学等有关课题组，正在研究将超级电容器储能(SCES)系统应用到分布式发电系统的配电网。但从整体来看，我国在超级电容器领域的研究与应用水平明显落后于世界先进水平。

2.3使用中应注意的问题

在超级电容器的使用中，应注意以下问题：①超级电容器具有固定的极性，在使用前应确认极性。

②超级电容器应在标称电压下使用。因为当电容器电压超过标称电压时会导致电解液分解，同时电容器会发热，容量下降，内阻增加，使其寿命缩短。

③由于ESR的存在，超级电容器不可应用于高频率充放电的电路中。

④当对超级电容器进行串联使用时，存在单体间
的电压均衡问题[13]。单纯的串联会导致某个或几个单体电容器因过压而损坏，从而影响其整体性能[6]。

3超级电容器在电力系统中的应用

3.1用于分布式发电系统

随着电力系统的发展，分布式发电技术越来越受到重视。储能系统作为分布式发电系统必要的能量缓冲环节，因而其作用越来越重要。超级电容器储能系统利用多组超级电容器将能量以电场能的形式储存起来，当能量紧急缺乏或需要时，再将存储的能量通过控制单元释放出来，准确快速地补偿系统所需的有功和无功，从而实现电能的平衡与稳定控制[14]。

2005年，美国加利福尼亚州建造了1台450kW的超级电容器储能装置，用以减轻950kW风力发电机组向电网输送功率的波动。

除此之外，储能系统对电力系统配电网电能质量的提高也可起到重要的作用。通过逆变器控制单元，可以调节超级电容器储能系统向用户及网络提供的无功及有功，从而达到提高电能质量的目的。

3.2用于变/配电站直流系统

我国20世纪60～80年代建设的35kV变电站及10kV开关站(室)，绝大多数高压开关(断路器)的操动机构是CDX型电磁操动机构。在变电站或配电站的配电室中均配有相应的直流系统，用作分合闸操作、控制和保护的直流电源。这些直流电源设备，主要是电容储能式硅整流分合闸装置和部分由蓄电池构成的直流屏。

电容储能式硅整流分合闸装置由于结构简单、成本低、维护量小而在当时得到广泛应用，但是在实际使用中却存在一个致命缺陷：事故分合闸的可靠性差。其原因是储能用电解电容的容量有限(只有几千μF)，漏电流较大[15]。

由蓄电池构成的直流屏虽然能存储很大的电能，在一些重要的变、配电站中成为必需装置，但由于其运营成本极高

、使用寿命不长，因此这些装置只能用于110kV级别的变电站，难以推广使用。

超级电容器以其超长使用寿命、频繁快速的充放电特性、便宜的价格等优点，使解决上述问题成为可能。如用2只0.85F，240/280V的超级电容器并联后就可完全替代笨重的、需要经常维护的、且有污染的蓄电池组。由于一次合闸的能耗只相当于超级电容器所储能量(70kJ)的3%，而这一能量在浮充电路中又可很快被补充，因而完全适应连续频繁的操动，且具有极高的可靠性。

3.3用于动态电压跌落装置

尽管很多用户选择不间断电源(UPS)作为电网断电或电网电压瞬时跌落时设备电源的补救装置，但对于电压瞬时跌落而言，UPS显得有些大材小用。UPS由蓄电池提供电能，工作时间持续较长，但是，由于蓄电池自身的缺点(需定期维护、寿命短)，使UPS在运行中需时刻注意蓄电池的状态。而电力系统电压跌落的持续时间往往很短(10ms～60s)，因此在这种情况下使用超级电容器的优势比UPS明显：其输出电流可以几乎没有延时地上升到数百安，而且充电速度快，可以在数分钟内实现能量存储，便于下次电源故障时起用[16]。因此尽管超级电容器的储能所能维持的时间很短，但当使用时间在1min左右时，它具有无可比拟的优势——50万次循环、不需护理、经济。在新加坡，ABB公司生产的利用超级电容器储能的动态电压恢复装置(DVR)安装在4MW的半导体工厂，以实现160ms的低电压跨越。

3.4用于静止同步补偿器

静止同步补偿器(STATCOM)是灵活交流输电技术(FACTS)的主要装置之一，代表着现阶段电力系统无功补偿技术新的发展方向。它能够快速连续地提供容性和感性无功功率，实现适当的电压和无功功率控制，保障电力系统稳定、高效、优质地运行。基于双电层电容储能的STATCOM，可用来改善分布式发电系统的电压质量。其在300～500kW功率等级的分布式发电系统中将逐渐替代传统的超导储能。经济性方面，同等容量的双电层电容储能装置的成本同超导储能装置的成本相差无几，但前者几乎不需要运行费用，而后者却需相当多的制冷费用[17]。

4今后研究的方向和重点

对于超级电容器，今后要研究的方向和重点是：利用超级电容器的高比功率特性和快速放电特性，进一步优化超级电容器在电力系统中的应用技术。此外，在我国大力发展新能源这一政策指导下，在光伏发电领域、风力发电领域，超级电容器以其快充快放等特点为改进和发展关键设备提供了有利条件。

5结束语

超级电容器的出现，解决了能源系统中功率密度与能量密度之间的矛盾。随着超级电容器技术的进一步发展，它将逐步取代当前需频繁更换的蓄电池，且家用储能系统也有可能得到实现。作为一种储能巨大、充放电速度快、工作温度范围宽、工作可靠安全、无需维护保养、价格低廉的储能系统，如能大量应用于电力系统，则必将推动技术进步和取得更大的经济效益。

6参考文献

[1]夏熙，刘洪涛.一种正在发展的储能装置——超电容器(2)[J].电池工业，2004，9(4)：181-188.

[2]钟海云，李荐，戴艳阳，等.新型能源器件——超级电容器研究发展最新动态[J].电源技术，2001，25(5)：367-370.

[3]Yoshida A.Surfacetechnology for electric double-layer capacitors[J].Jpn Surf Technol，1997，48(12)：1163-1168.

[4]吉田昭彦.活性炭 を 用 いた 电化学 キヤバシタ[J].电气化学および 工业物理化学，1998，66(9)：884-891.

[5]崔淑梅，段甫毅.超级电容电动汽车的研究进展与趋势[J].汽车研究与开发，2005(6)：31-36.

[6]张步涵，王云玲，曾杰.超级电容器储能技术及其应用[J].水电能源科学，2006，24(5)：50-52.

[7]张光敏，阎康平，严季新.用导电聚合物电极的超电容器研究概况[J].电子元件与材料，1999，18(5)：42-44.

[8]张慧妍，齐智平.超级电容器储能单元的设计分析[J].电源技术，2006，30(4)：322-325.

[9]李荐，钟晖，钟海云，等.超级电容器的应用设计[J].电源技术，2004，28(6)：388-391.

[10]朱磊，吴伯荣，陈晖，等.超级电容器研究及其应用[J].稀有金属，2003，27(3)：385-390.

[11]Conway B E.Some basic principles involved in supercapacitor operation and development[C].Proc.3rd Int.Seminar on Double Layer Capacitorsand Similar Energy Storage Devices，Deerfield Beach，Florida，1993，8.

[12]Kotz R，CarlenM.Principles andapplicationsof electrochemical capacitors[J].Electrochimica Acta，2000(45)：2483.

[13]Rizoug N，Bartholomefis P，Pierre X.Voltage sharing in supercapacitormodules：experimental study[C].In Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference，Aachen，Germany，2004，(1)：690-696.

[14]鲁蓉，张建成.超级电容器储能系统在分布式发电系统中的应用[J].电力科学与工程，2006(3)：63-67.

[15]薛洪发.超大容量电容器在铁路运输生产中的应用[J].中国铁路，2000(5)：52.

[16]Halpin SM，Ashcraft S R.Design considerations for single-phase uninterruptiblepower supplies using double-layer capacitors as the energy storage element[C].In Proceedings of IEEE Industry Applications Conference，San Diego，America，1996(4)：2396-2403.

[17]HalpinSM，Spyke R L，Nelms R M.Application of double-layer capacitor echnology to static condensersfor distribution system voltage control[J].IEEE Transactions on Power Systems，1996，11(4)：1899-1904.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/94300.html