

超级电容器的发展及应用现状

黄晓斌^{1,2}, 张 熊^{1,2}, 韦统振^{1,2}, 齐智平¹, 马衍伟^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 超级电容器是近几十年发展起来的一种新型储能器件, 具有功率密度大、循环寿命长、低温性能好等特点, 已在电力、交通、工业等领域得到了广泛的应用。本文介绍了超级电容器的种类和基本原理, 以及近年来国内外超级电容器产业的发展和市场现状。随后对超级电容器的主要应用领域及其现状进行了综述。最后针对超级电容器能量密度相对偏低的缺点, 提出了相关的研究和发展建议。

关键词: 超级电容器; 电力; 交通; 工业; 机械

DOI: 10.12067/ATEEE1709060

文章编号: 1003-3076(2017)11-0063-08

中图分类号: TM242

1 引言

随着全球经济的迅速发展, 化石能源的快速消耗和环境污染的日益恶化, 人类对可持续和可再生能源的需求日益增加, 激发了科研人员对高效、清洁的能量转换和储能器件的研究。在众多的储能器件中, 超级电容器是20世纪七八十年代发展起来的一种新型储能器件, 具有优良的脉冲充放电性能, 功率密度高于蓄电池, 能量密度又高于传统电容, 传统电容器、电池和超级电容器的 Ragone 图比较如图1所示。此外, 超级电容器充放电效率高(大于90%), 寿命超长(百万次以上), 适用温度范围宽, 可在-40~70℃。因具有这些独特的性能, 超级电容器吸引了众多科研人员的关注, 也使得超级电容器在电力、工业、交通等领域, 包括现今无处不在的移动电子设备、电力系统的元器件和新能源汽车下一代能量储存系统等方面, 取得了不少商业化的应用。

本文将按种类及其储能原理对超级电容器进行介绍, 随后介绍当前国内外超级电容器领域的市场现状, 以及超级电容器的主要应用领域和相关进展, 最后, 对超级电容器的发展状况进行总结, 并对超级电容器的发展提出了相关建议。

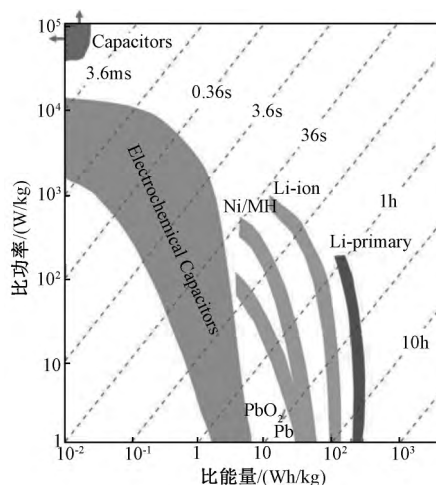


图1 传统电容器、电池和超级电容器的 Ragone 图比较^[1]

Fig. 1 Comparison of Ragone graphs of traditional capacitors, batteries and supercapacitors^[1]

2 超级电容器的分类

根据储能机制的不同, 超级电容器可被分为双电层电容器和赝电容器两类, 本章对这两类超级电容器及其基本工作原理进行介绍。

2.1 双电层电容器

双电层电容器基本工作原理: 双电层电容器的内部基本构造如图2(a)所示, 隔膜将浸润了电解液

收稿日期: 2017-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677182)

作者简介: 黄晓斌(1992-), 男, 广东籍, 硕士研究生, 研究方向为超级电容器;

张 熊(1981-), 男, 湖南籍, 研究员, 博士, 研究方向为超级电容器储能技术。

的两电极分隔开。在充电时,正负电荷分别在两电极表面积累,两电极分别带正、负电,从而形成电容效应;放电时,电极表面积累的电荷又回到电解液中,在外电路产生放电电流。

碳材料具有电导率高、比表面积大、稳定性好、电位窗口宽等特点,在储能器件领域受到广泛的研究和应用^[2]。目前超级电容器研究和应用较多的碳材料,包括活性炭、石墨烯、碳纳米管、模板碳等^[3]。不同碳材料的微观形貌和理化性质不同,电化学储能性能有所差别,不同碳材料的比电容对比如图2(b)所示。

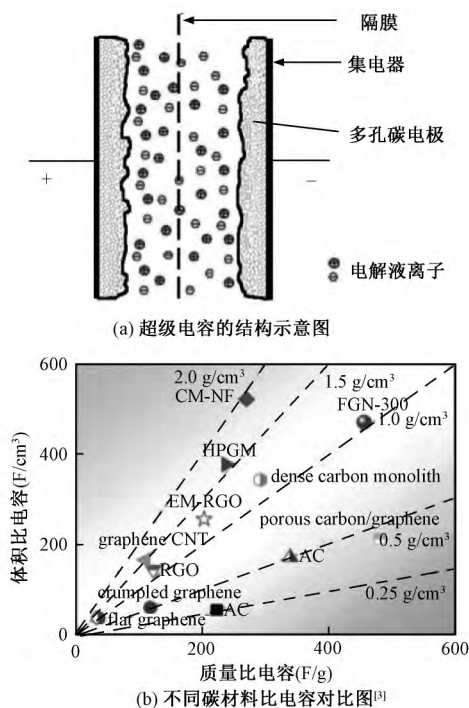


图2 超级电容的结构示意和碳材料比电容对比

Fig. 2 Schematic diagram of supercapacitor structure and comparison of specific capacitance

2.2 赝电容器

赝电容器,也称法拉第电容器,其基本工作原理:赝电容器主要以金属氧化物或导电聚合物作为电极。充电时,在电极和电解液表面发生快速的氧化还原反应或法拉第过程,因电极材料的氧化还原电位发生改变,两电极之间产生电势差,形成赝电容效应;放电时,电极又与电解液发生与充电过程相反的逆反应,两电极间电势差降低,实现放电。

目前研究较多的赝电容器材料包括,金属氧化物、金属氢氧化物、导电聚合物等。然而,赝电容材料大多受限于循环稳定性相对较差的缺点,往往需

要与碳材料形成复合物以提高循环寿命和充放电性能^[4]。

3 超级电容器的市场现状

国外研究超级电容器起步较早,技术相对比较成熟。许多国家早已将超级电容器项目作为国家级的重点研究和开发项目,提出了近期和中长期发展计划。据智研咨询的《中国超级电容器市场研究及投资前景分析报告》,2015年全球超级电容器市场规模达到160亿美元,是2007年市场规模的4倍,并预计未来五年的年复合增长率有望达到21.3%。目前美国Maxwell公司在高性价比超级电容器储能和输电解决方案的开发和制造领域居全球领先地位。俄罗斯的Elit公司、法国的Saft公司、美国的IOXUS公司和Cooper公司、韩国的Nesscap、日本的Nippon公司、NEC公司和Panasonic公司也投入巨额资金对大容量超级电容器进行规模化生产的研究。俄罗斯的ESMA公司是生产无机混合型超级电容器的代表。

国内方面,因国家对新能源产业的政策性扶持,超级电容器产业近年来飞速发展。据智研咨询的报告,国内超级电容器市场2012-2015年年均复合增速超过40%,2015年国内超级电容器市场为66.5亿元,是2009年的6倍。国内大多厂商生产双电层电容器,重要企业有宁波中车新能源、北京集星、上海奥威、锦州凯美、哈尔滨巨容、南通江海、天津力神、湖南耐普恩等十多家,国内外市场主流的3000F级别超级电容器的主要性能指标比较见表1,国内厂商与国际厂商虽仍有差距,但已在逐步缩小。宁波中车新能源科技有限公司依赖强大的资金和技术,近年来研制出适用于有轨和无轨电车的石墨烯

表1 国内外商用3000F级超级电容器主要性能参数表

Tab. 1 Main performance parameters of commercial 3000F-class supercapacitors at home and abroad

公司	容量 /F	内阻 /mΩ	电压窗口 /V	能量密度 / (Wh/kg)	峰值功率 密度 / (kW/kg)
美国 Maxwell	3000	0.27	3	7.2	16
美国 IOXUS	3150	0.17	2.85	4.5	23
韩国 Nesscap	3400	0.24	3	8.5	18.7
日本 Nippon	2300	1.2	2.5	4.2	3
宁波中车 新能源	3000	0.23	2.7	5.64	14.73
洛阳凯迈	3000	0.28	2.7	5.52	13.8
上海奥威	3500	0.3	2.7	4.8	8.4

基超级电容器, 单体容量达到万法级, 处于世界领先水平。上海奥威科技开发有限公司开发的“车用超级电容器”在技术水平上也较为先进。

4 超级电容器的应用

4.1 电力

因其优异的性能, 超级电容器在分布式发电的多个方面已经实现了实用化。

4.1.1 分布式发电及其并网

在分布式发电中, 可将超级电容器用于单独储能, 或与其他储能装置进行复合储能如图 3 所示, 充分发挥其功率密度大、循环寿命长、储能效率高、无需维护等优点, 可解决分布式发电系统中发电设备的输出功率不稳定和不可预测的问题^[5]。这些领域包括风力发电^[6-8]、光伏发电^[9-11]等。在这些分布式发电系统中, 超级电容器可以对系统起到瞬时功率补偿的作用, 并可以在发电中断时作为备用电源, 以提高供电的稳定性和可靠性。中国科学院电工研究所与江苏双登企业合作开发用于太阳能路灯的超级电容器模组, 成功应用于 2008 年北京奥运会场馆。

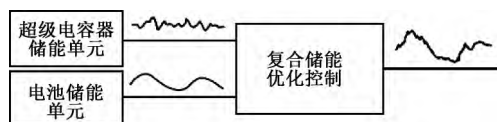


图 3 超级电容器与电池的复合储能示意图

Fig. 3 Schematic diagram of composite storage energy of supercapacitors and batteries

此外, 分布式发电目前也面临着并网难度大、脱网事故多发的严峻问题。将分布式发电产生的电能, 经整流和升压为高压直流; 将超级电容器(模组)串联, 升高耐受电压, 再经升降压直流斩波变换器连接到直流母线上。当电源出现暂降或断供等不稳定问题时, 超级电容器储能系统会升高电压, 维持母线电压并稳定在规定值附近; 当发生电源功率变大或负荷变小时, 超级电容器会吸收能量充电, 降低并稳定母线电压。因此, 超级电容器储能系统可保证直流母线电压稳定在允许的范围内, 减小分布式发电并网时对电网的冲击^[10, 12]。

4.1.2 风机变桨系统

风力发电是将风能这种分布广泛的可再生清洁能源, 转化为电能最直接有效的方法, 其中风机变桨距系统是维持风力发电机平稳运行的关键。

正常运行期间, 根据风速的变化, 风机变桨角度

会自动进行调整, 通过控制叶片的角度使风机的转速保持恒定; 当机组发生严重故障或重大事故的情况时, 风机变桨系统配备的备电池系统确保机组安全停机。目前备电池使用较多的是蓄电池组, 但因其更换频率过大和可靠性的问题, 严重影响了风机的无故障停机时间等指标。相较于蓄电池, 超级电容器具有工作温度范围宽($-40 \sim 70^{\circ}\text{C}$)、寿命长、老化缓慢、稳定性好、重量轻、维护成本低等显著的优点, 用超级电容器替换蓄电池, 可以大幅度降低风机维护成本和提高其运行指标^[6, 7]。风机变桨和超级电容模组如图 4 所示。图 4(a) 为风力发电机组及其风机变桨系统, 图 4(b) (来自于 Maxwell 官网) 为 Maxwell-160V 的超级电容器模组, 主要设计用于 1.5~3MW 风机的变桨系统。



(a) 风力发电机组中的风机变桨系统



(b) Maxwell 的 160V 超级电容器模组

图 4 风机变桨和超级电容模组

Fig. 4 Wind turbine paddles and supercapacitor module

4.1.3 电力调节与电能质量调整

稳定的电能质量, 对于电网的安全、经济运行、保障工业产品质量和科学实验的正常进行以及降低能耗等方面均有重要意义。将超级电容器合理地应用在电力调节和动态电压补偿系统中, 可有效地调整电能质量。

在电网或配电网的电力调节中, 可将超级电容器作为储能装置用于动态电压补偿系统, 超级电容器动态电压补偿系统基本原理如图 5 所示。当电网或配电网出现电压跌落、闪变和间断等电能质量问题时, 超级电容器通过逆变器释放能量, 及时输出补偿功率并维持一定的时间, 以保证电网电压稳定, 使

敏感用户设备正常、不间断地运行^[13]。在电网或配电网的动态电压补偿系统(DVR)中,超级电容器的应用可以起到改善电能质量的作用^[14]。超级电容器时间常数约为1s,对于设计补偿时间约为2s的DVR产品来说具有较高的性价比。2011年中国科学院电工研究所推出国内首个超级电容器DVR产品;闲时效率达99.2%,为目前公开报道的最高水平。通过中国机械工业联合会和中国电工技术学会联合组织的产品鉴定,一致认为达到国内领先水平。

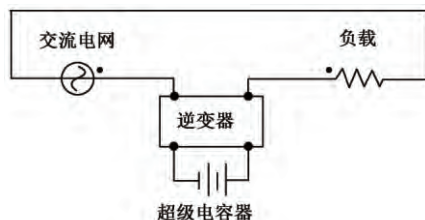


图5 超级电容器动态电压补偿系统基本原理
Fig. 5 Basic principle of dynamic voltage restorer with supercapacitors

4.2 交通

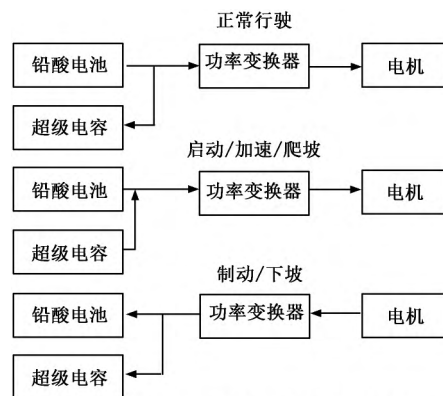
4.2.1 汽车

因具有充放电快、功率大的特点,超级电容器可应用于汽车起步、加速及制动过程中的能量回收和释放。配备了超级电容器启停系统的汽车,因瞬间功率高,加速性能得以提高;当汽车制动减速时,超级电容器又可迅速回收能量^[15,16]。此外,蓄电池因减少了大电流和重复周期,使用寿命得以延长。复合电源的工作模式和配备超级电容启停系统的汽车如图6所示。图6(a)为配备超级电容器和铅酸电池复合储能的三种工作模式。图6(b)和图6(c)为两款配备了超级电容启停系统的汽车,与传统汽车相比,配备了超级电容启停系统的汽车,可达到降低燃油成本、提高汽车性能、降低排放、优化驾驶体验的效果。

此外,超级电容器也可以应用于汽车的低温启动。将超级电容器与蓄电池并联,蓄电池的启动速度将会得以提高^[17]。因为冬季气温较低,蓄电池性能严重下降,传统的汽车可能难以、甚至无法启动;因超级电容器低温性能好,采用超级电容器与蓄电池并联的系统,可以明显改善汽车在低温时的启动性能,相较于单一的蓄电池系统具有显著的优势。

4.2.2 公交车

传统公交车采用柴油发动机产生动力,起步加速油耗较大,减速停站时又浪费了大量动能,因此,



(a) 配备超级电容器的复合电源3种工作模式^[18]



(b) 凯迪拉克2016款CTS



(c) 马自达CX-5

图6 复合电源的工作模式和配备超级电容启停系统的汽车

Fig. 6 Working modes for composite power, and cars equipped with supercapacitor start and stop system

传统公交车的能量利用率效率很低,并且会排放大量因燃烧不充分而产生的有害物。

因公交车具有行驶路线和停靠地点固定,启停次数多的特点,将超级电容模组用于公交车的储能和动力系统,可实现提高能源利用率,降低有害气体排放,减少噪音的效果^[19,20]。

2006年,上海市采用奥威超级电容公交车的11路开通如图7所示,成为世界上第一条商业化运行的超级电容车公交线路。目前,上海已有包括11路、26路、920路等多条奥威超级电容公交车线路。另外,中国中车的超级电容公交车也已于2015年在宁波下线,目前宁波已有包括306路、330路等多条超级电容公交线路。

4.2.3 城市轨道交通

地铁、有轨电车、磁浮列车等城市轨道交通启停



图7 上海11路-奥威超级电容器公交车
Fig. 7 Shanghai 11 Route supercapacitor bus

较为频繁。因具有充放电快、功率高、寿命长的特点,超级电容器也适用于城市轨道交通工具的储能器件^[21,22]。

2014年,广州市开通了从万胜围站-广州塔站的有轨电车,该有轨电车采用超级电容器作为储能元件,理论使用寿命达10年。2016年,我国首列从整车技术到零部件,均全部实现自主化的超级电容储能100%低地板技术现代有轨电车在株洲首次亮相。该类有轨电车全程采用无架空接触网运行,仅需在站台充电30s,即可行驶3至5km。该有轨电车因其地板低,可便于乘客上下车;同时,因无站台,可减少线路投资;此外还有速度快、运量大、编组灵活、安全、适时、节能、环保等特点。磁浮列车制动能量约占总耗电量的20%,目前为电阻消耗,能量浪费巨大。中国科学院电工研究所研发出基于超级电容器轨道交通制动能量回收利用系统(500kW/5kWh),实现制动能量回收总效率>90%(具体节电率取决于实际应用工况),目前安装在上海高速磁浮1.5km示范线站点上,其超级电容器制动能量回收利用装置如图8所示。



图8 超级电容器制动能量回收利用装置
Fig. 8 Braking energy recovery and utilization device of supercapacitor

地铁方面,于2016年11月30日,国内首套由宁波中车新能源科技有限公司、广州地铁设计研究

院有限公司、广州中车有轨交通研究院有限公司等单位联合研制,拥有自主知识产权的1500V地铁列车用超级电容器储能装置在广州地铁6号线浔峰岗站正式挂网运行,这标志着以超级电容器为核心部件的新型制动能量回收利用装置,在我国城市轨道交通领域中的应用获得了突破性进展。基于超级电容的再生制动能量回收装置能有效改善牵引供电质量,实现再生电能的有效利用,节能降耗。超级电容地铁制动能量回收利用系统示意图如图9所示。

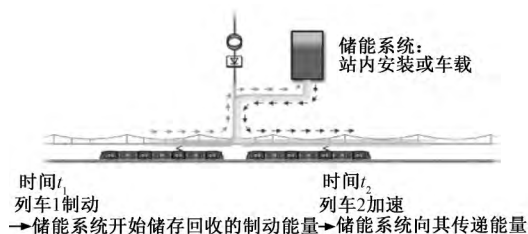


图9 地铁超级电容器制动能量回收利用装置示意图
Fig. 9 Schematic of braking energy recovery and utilization device of supercapacitor

4.3 工业与机械

4.3.1 起重机

起重机在港口、建筑和矿业等领域应用广泛,其储能需求的典型特点为高占空比的深度放电周期。采用超级电容器能量管理系统,利用制动和下降过程中的能量回收,可为起重机节省燃油40%^[23],装配超级电容能量管理装置的起重机如图10所示。此外,因无需发动机提供峰值功率,还能缩小柴油发动机的体积,从而进一步节省燃油。在现今全球变暖和废气排放日益严峻的气候条件下,降低了燃油的消耗量,提高了能源的利用率,为节能减排提供贡献。



图10 装配超级电容器能量管理装置的起重机^[24]
Fig. 10 Cranes for assembly of energy management devices for supercapacitors^[24]

4.3.2 油井设备

在正常钻井过程中,需要保证转盘处于恒转速

运转状况之下,但转盘扭矩会因井底地层的原因,始终发生变化,在跳钻时的变化会更为明显,这直接导致输入功率的波动。功率始终处于波动的状态时,当扭矩增大,消耗功率大;当扭矩减小,消耗功率相应就变小。此时,多出的部分能量被能耗电阻消耗,转变成热能被浪费。油井设备在起下钻过程中所损耗的能量相当巨大。若在此系统中使用超级电容回收能量,将下钻过程被浪费的动力能源及时储存回收应用,在下次扭矩增大时使用,可以直接降低柴油的消耗,减少排放,提高能源利用率。据中车株机公司发布的消息,2016年1月,其研发的国内首台石油钻井机超级电容储能系统投入应用如图11所示,该钻井机配备有1280只中车株机公司研发的9500F超级电容器单体,总功率最大可达600kW,日均节省柴油500L。



图11 中车株机公司研发的国内首台配备超级电容储能系统石油钻井机

Fig. 11 First domestic oil drilling machine with supercapacitor energy storage system developed by China Vehicle Plant machine

4.3.3 不间断电源 UPS

不间断电源(Uninterruptible Power System, UPS)能在断电的几秒到几分钟内提供备用电能,蓄电池需要在这段时间提供电能。因蓄电池寿命短,在UPS运行时需要时刻检测蓄电池的状态,并且需要定期维护和更换蓄电池。在数据保护的备份系统中,需UPS提供的时间相对很短,而蓄电池的大部分能量并未被充分利用,而小容量蓄电池的放电能力又不足。超级电容器可以在很短的时间内实现能量存储,因具有功率高、充放电速度快、寿命长和免维护的特点,可以满足几分钟的供电需求,因此可以

代替蓄电池应用在UPS中;此外,也可以与蓄电池组成复合不间断电源,Maxwell公司56V的超级电容器UPS模块如图12所示(图片来自于Maxwell官网)。



图12 Maxwell公司56V的超级电容器UPS模块
Fig. 12 56V supercapacitor UPS module by Maxwell

4.3.4 电梯

中国是目前世界上最大的电梯制造国,现在中国电梯的使用量和新增量均为世界第一,根据质检总局关于2016年全国特种设备安全状况情况的通报,截止2016年底全国共有在用电梯数量达493.69万台,一部传统电梯每年用电量大约为1.5万kW·h。电梯运行中,重载下行、轻载上行及减速时会产生势能和制动能量。采用超级电容器,在电梯制动时回收能量,在电梯加速启动时进行释放,可起到大幅节能的效果^[24,25]。此外,当电梯发生停电或故障的时候,超级电容器电源系统可维持照明、通风和通讯,将电梯送至临近楼层并开门,提高电梯的安全性。上海虹桥的国家会展中心内,约有200部垂直电梯采用了奥威的第四代超级电容器电源系统。

5 结论

国外的部分超级电容器企业凭借多年的积累,在产业化和市场占有方面处于领先地位。随着国家政策对新能源领域的扶持,国内超级电容器领域的研究和产业化水平也逐年提高。随着单体的性能指标不断提高、模组技术日益成熟,超级电容器目前已在诸多领域取得了广泛的应用。然而,因受限于能量密度相对偏低的缺点,超级电容器仍难以完全取代传统电池。因此,超级电容器的能量密度亟待提高,需要开发出高性能的电极材料、高稳定性的电解液以及新型非对称性结构的超级电容器,优化单体制备工艺,这将是今后超级电容器领域重要的研究和发展方向。

参考文献 (References):

- [1] Simon P, Gogotsi Y. Materials for electrochemical capacitors [J]. Nature Materials, 2008, 7 (11): 845-854.
- [2] Zhang J, Terrones M, Park C R, et al. Carbon science in 2016: Status, challenges and perspectives [J]. Carbon, 2016, 98: 708-732.
- [3] Wang Q, Yan J, Fan Z. Carbon materials for high volumetric performance supercapacitors: design, progress, challenges and opportunities [J]. Energy and Environmental Science, 2016, 9 (3): 729-762.
- [4] Borenstein A, Hanna O, Ran A, et al. Carbon-based composite materials for supercapacitor electrodes: a review [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5 (25): 12653-12672.
- [5] 董博, 李永东, 郑治雪 (Dong Bo, Li Yongdong, Zheng Zhixue). 分布式新能源发电中储能系统能量管理 (Energy management of hybrid storage in distributed generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (1): 22-25.
- [6] 唐坤, 张广明, 欧阳慧珉, 等 (Tang Kun, Zhang Guangming, Ouyang Huimin, et al.). 超级电容在风力发电中的应用及未来发展 (Application and future development of supercapacitor in wind power) [J]. 电源技术 (Chinese Journal of Power Sources), 2015, 39 (5): 1114-1117.
- [7] 于超光, 于红理, 胡明清 (Yu Chaoguang, Yu Hongli, Hu Mingqing). 风力机变桨系统超级电容充电机设计与仿真 (Super capacitor charger design and simulation of pitch system for wind turbine) [J]. 变频器世界 (The World of Inverters), 2015, (3): 39-42.
- [8] 丛晶, 宋坤, 鲁海威, 等 (Cong Jing, Song Kun, Lu Haiwei, et al.). 新能源电力系统中的储能技术研究综述 (Review of energy storage technology for new energy power system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 53-59.
- [9] 程志江, 李永东, 谢永流, 等 (Cheng Zhijiang, Li Yongdong, Xie Yongliu, et al.). 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略 (Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (10): 2739-2745.
- [10] 刘耀远, 曾成碧, 李庭敏, 等 (Li Yaoyuan, Zeng Chengbi, Li Tingmin, et al.). 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究 (Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2014, 42 (13): 77-82.
- [11] 唐西胜, 齐智平 (Tang Xisheng, Qi Zhiping). 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究 (Study on an actively controlled battery ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (3): 37-42.
- [12] 刘伟, 康积涛, 李珊, 等 (Liu Wei, Kang Jitao, Li Shan, et al.). 超级电容储能技术在分布式发电系统中的应用 (Application of Super Capacitor energy storage technology in distributed power generation system) [J]. 华电技术 (Huadian Technology), 2010, 32 (12): 32-33.
- [13] 李鹏飞 (Li Pengfei). 基于超级电容储能的微网电能质量调节器研究 (Study on microgrid power quality conditioner based on energy storage of super-capacitor) [D]. 兰州: 兰州交通大学 (Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University), 2016.
- [14] 沙鸥, 孙玉坤, 张亮, 等 (Sha Ou, Sun Yukun, Zhang Liang, et al.). 基于超级电容储能的动态电压恢复器研究 (Research on dynamic voltage restorer based on supercapacitor energy storage) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2014, 51 (13): 98-102.
- [15] 陈天殷 (Chen Tianyin). 汽车领域中超级电容器的应用与维护 (Application and maintenance of supercapacitor in automotive field) [J]. 轻型汽车技术 (Light Vehicle Technology), 2016, (3): 3-11, 19.
- [16] 张炳力, 赵韩, 张翔, 等 (Zhang Bingli, Zhao Han, Zhang Xiang, et al.). 超级电容在混合动力电动汽车中的应用 (Application of super Capacitor in hybrid electric vehicle) [J]. 汽车工程学报 (Chinese Journal of Automotive Engineering), 2003, (5): 48-50.
- [17] 王恒, 洪光, 傅冠生, 等 (Wang Heng, Hong Guang, Fu Guansheng, et al.). 超级电容器用于汽车低温启动可行性研究 (Feasibility study of super capacitor used in low temperature start-up of automobiles) [J]. 北京汽车 (Beijing Automotive Engineering), 2015, (6): 39-41.
- [18] 陈立超, 张昕, 张欣 (Chen Lichao, Zhang Xin, Zhang Xin). 超级电容式混合动力电动汽车控制策略的研究 (Research on control strategy of super-capacitive hybrid electric vehicle) [J]. 北京汽车 (Beijing Automotive Engineering), 2011, (2): 9-14.
- [19] 华黎 (Hua Li). 超级电容公交车系统的原理和商业模式探索 (Exploration on the principle of ultracapacitor bus system and business mode) [J]. 能源技术 (Energy

- Technology), 2008, 29 (6): 362-365, 370.
- [20] 姚刚, 吕超, 刘速飞 (Yao Gang, Lv Chao, Liu Sufei). 考虑行程可靠性和投资经济性的超级电容公交车站距分析 (Analysis of super capacitor public transport charging station considering travel reliability and investment economy) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2017, (2): 76-81.
- [21] 张婷婷, 张伟先, 胡润文 (Zhang Tingting, Zhang Weixian, Hu Runwen). 基于超级电容的有轨电车储能电源系统介绍 (Introduction of power supply system for tram based on Super capacitor) [J]. 技术与市场 (Technology and Market), 2016, 23 (5): 98-99.
- [22] 赵军, 范晓云, 何杜明, 等 (Zhao Jun, Fan Xiaoyun, He Duming, et al.). 超级电容有轨电车供电系统研究 (Research on the Power Supply System for the Super Capacitor Tramcar) [J]. 电力电子技术, 2017, 51 (6): 86-88.
- [23] Miller J R, Simon P. Electrochemical Capacitors for Energy Management [J]. Science, 2008, 321 (5889): 651-652.
- [24] 宫成, 焦然, 迟忠君, 等 (Gong Cheng, Jiao Ran, Chi Zhongjun). 超级电容在电梯节能中的应用 (Application of super capacitor in elevator energy saving) [J]. 电气应用 (Electrotechnical Application), 2014, 33 (22): 53-58.
- [25] 邓哲, 周峰武, 吕征宇 (Deng Zhe, Zhou Fengwu, Lv Zhengyu). 基于超级电容储能与电压型变流器的电梯能量回收系统效率优化控制策略 (Novel push-pull forward converter for high reliability and high input voltage applications) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (2): 22-28.

Development and applications status of supercapacitors

HUANG Xiao-bin^{1,2}, ZHANG Xiong^{1,2}, WEI Tong-zhen^{1,2}, QI Zhi-ping¹, MA Yan-wei^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Supercapacitor is a new type of energy storage device developed in recent decades, with the characteristics of high power density, long life and good low-temperature performance, and has been widely applied in electric power, transportation, industry and other fields. This paper introduces the types and basic principles of supercapacitors, as well as the development and market status of supercapacitor industry in recent years. Then, the main application fields and current situation of supercapacitor in China are reviewed. In the end, the relative suggestions focusing on the main defect of supercapacitor, low energy density, is proposed.

Key words: supercapacitor; electricity; transportation; industry; machinery