# 超级电容在电力系统中的应用

董均宇[1]，杨洋[2]，王雨[3]

(1.云南电网公司，昆明650051；2.云南电网公司电力研究院，昆明650217；3.云南电网公司博士后及研究生工作站，昆明650217)

摘要：对超级电容的工作原理、运行特点、充放电特性以及在电力系统中的应用进行了较全面的介绍，还利用Matlab/Simulink仿真软件搭建了超级电容的工程简化模型，对超级电容用作储能系统来平抑分布式光伏系统发电功率进行了仿真。

## 1前言

超级电容器是介于化学电池与普通电容器两者之间的一种新型储能元件，由于它具备超大电容量、高功率密度、充放电速度快、转换效率高、控制简单、无污染、循环寿命长、使用温度范围宽等诸多优点，使其越来越受到各国的重视，并已在多个领域内得到了广泛的应用[1−2]。

近年来，电力系统中的超级电容器运用也越来越多，由于超级电容器可在短时间内提供大功率输出，根据这一特性，可以用来提高用电可靠
性和改善电能质量，例如将超级电容用来平抑分布
式能源发电功率[3]、动态电压调节器[4−5]、大规模电力储能系统[6]
、高压变电站及开关站的电容储能式硅整流分合闸装置中的直流电源[7]等。

文献[5]设计了一种基于超级电容器储能系统的动态电压调节器，该调节器在设计时，直流侧储能单元采用超级电容，这种设计可以在电源电压骤降时，利用超级电容快速放电特性补偿跌落点无功功率，达到维持负荷电压稳定的目的。

以下对超级电容的工作原理、运行特点、充放电特性以及在电力系统中的应用进行了较全面的介绍，还利用Matlab/Simulink仿真软件搭建了超级电容的工程简化模型，对超级电容用作储能系统来平抑分布式光伏系统发电功率进行了仿真。

## 2超级电容器的原理和特点

### 2.1超级电容器原理

超级电容器主要是由电极、电解质、隔膜、引线和封装材料等组成。按存储能量的机理不同可分为双电层电容(Electric double layer capacitor，EDLC)和赝电容(Pesudocapacitor，也叫法拉第准电容)[8−9]。

双电层电容的机理是插入电解质溶液中的金属电极上的静电荷会吸引电解液中的极性相反的离子，并在电极/溶液界面形成一个剩余电荷数量相等的界面层。当在正负电极上施加电压后，在电场的作用下电解液中的阴、阳离子会迅速向电极移动移动，在电极表面形成双电层，它所形成的双电层和传统电容器中的极化电荷相似，从而产生电容效应。

赝电容是电活性物质在电极材料表面或体相的二维或准二维空间上发生欠电位沉积，进行高度可逆的氧化/还原或吸附/脱附化学反应，产生与电极充电电位有关的电容。由于氧化/还原或吸附/脱附反应，电荷存储不仅包括双电层还包括电极内部，这就大大提升了赝电容的容量。相同电极面积下，双电层电容的容量仅有赝电容的1%～10%。

### 2.2超级电容器特点

超级电容器作为一种新型的储能元件，具有如下优点：

1)超高的容量。相同体积情况下，超级电容的容量可以比电解电容器大几千倍。

2)高功率密度。超级电容器能在很短的时间内输出高达几百甚至几千安的电流，相比同体积的电池而言，其功率密

度达10倍以上，对于短时间需要大功率输出的场合，超级电容器非常适合。

3)循环寿命长，充放电效率高。由于超级电容器的充放电过程只有电荷的转移，属于物理过程，其间没有化学反应。这一特点使得超级电容器的放电循环次数达到10万次以上，且充放电速度是同体积蓄电池的100倍以上。

4)可以承受短时间内的过电压，对过充、过放承受能力较强。

5)温度范围宽，达－40°C～+70°C(一般电池是－20°C～+60°C)，且无污染，免维护。

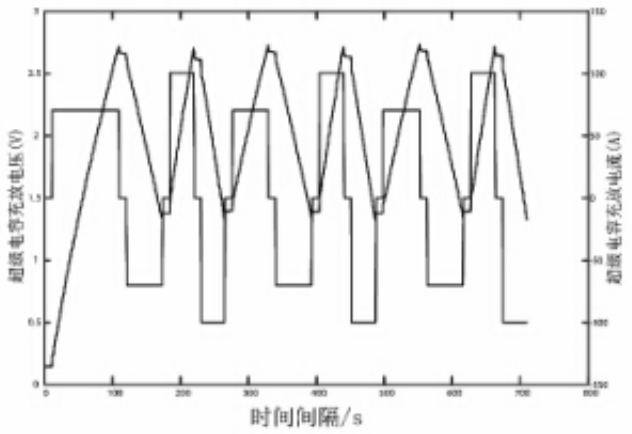
当然超级电容也有一些缺点，例如：能量密度偏低，漏电流较大，单体工作电压低等。

2.3充放电特性

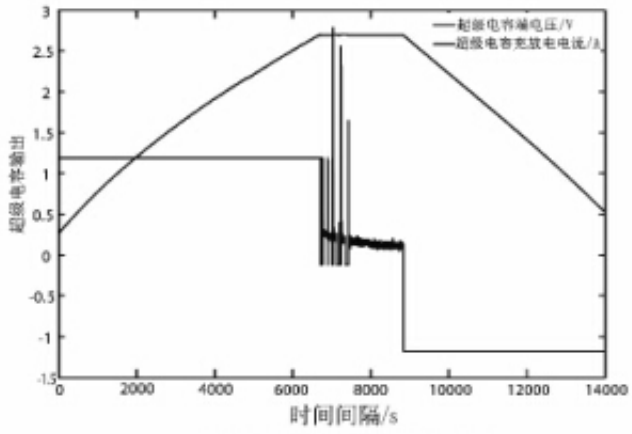
为了研究超级电容的充放电特性，采用单体超级电容来做充放电特性测试实验，采样间隔为1s，其中的单体超级电容选用的是迈凯嘉华新能源公司的UCPY3000F，其电容容量为3000F，额定电压为2.7V，充放电特性如图1所示。

从图1中可以看出：

1)当对超级电容充放电时，超级电容的电压会不断变化，且充放电电流越大，电压变化的斜率越大，充放电循环也就越快，相应的充放电功率也就越大。




（a）脉冲电流充放电实验




（b）渐变电流充放电试验

图 1　超级电容充放电试验

2)当充放电停止时，超级电容会有一个稳定的电压，且该电压相较充放电结束时刻电压值有个小幅度的降低，这是

超级电容器电极－电解质的电阻性质所引起的。

**3在电力系统中的应用**

超级电容具有很多优良的特性并在航天航空、电力系统、交通、电力电子等多个领域成功的应用。如作为后备电源应用于电子产品中，作为电启动系统应用于汽车、坦克等内燃发动机。其中，在电力系统中的应用主要有：

1)作为储能装置代替传统电容器应用在高压变电站及开关站的电容储能式硅整流分合闸装置中；

2)基于APF(Active Power Filter，电力有源滤波器)拓扑的电能质量调节器，其原理是在直流侧并联超级电容，利用其快速充放电性能达到补偿负荷的功率波动和电压波动的作用；

3)用于光伏、风力发电等分布式能源发电以及微网的储能系统，利用其输出(吸收)功率密度高的特点对分布式能源发电的随机性和波动性进行平滑，达到削峰填谷的效果。

3.1电容储能式硅整流分合闸装置

传统断路器操动机构是CD－X型电磁操动机构，该机构采用直流电源提供动作所需能量。目前直流电源主要采用蓄电池，但是常年使用的蓄电池会出现内阻增大、容量下降等问题，进而导致功率输出能力变差，这些缺点使得蓄电池直流电源无法在所有工况下保证分合闸所需要的能量，可能在故障时出现断路器无法动作的情况，可靠性较差。文献[7]提出了一种基于超级电容储能技术的新型直流电源，将超级电容和蓄电池配合使用，克服了传统CD－X型电磁操动机构的直流电源存在的充电机不能正常运行，并且无法修复、蓄电池损坏严重等问题。

3.2负荷电能质量调节器

近年来，由于大量含有电力电子装置的非线性负载接入电网而导致了电网谐波水平逐年升高的问题和由交直流电弧炉、电弧焊机、工业轧机、绞车、电力牵引机车等大容量冲击性负荷的启动引起的电压暂降问题等负荷电能质量问题越来越受到人们的重视。文献[4]提出了负荷质量调节器(Unified Load Quality Conditioner，ULQC)的概念，该调节器的主电路以并联型APF拓扑为基础，在直流母线上放置超级电容作为储能装置，并设计双管升降压斩波电路来控制超级电容，利用超级电容容量大充放电速度快的特点调节器能够快速平抑负荷的波动功率或突变功率，从而改善负荷的品质，到达提高电能质量的效果。

3.3分布式能源的储能系统

随着越来越多的分布式能源接入电网，分布式能源如风电、光伏等的发电功率具有的随机性和波动性势必会给电网运行、调度、控制等方面带来负面的影响。为此，储能技术的发展成为解决此问题的有效手段。特别地，超级电容因其具有能在短时间内提供大功率的优点，使得其在作为分布式能源的储能系统上发挥出了优势。文献[3]介绍了一种基于超级电容储能的风电场功率调节系统，该系统的特点是在风电场输出母线配置PCS，并将超级电容器组成容量较大的电容器组作为储能装置并联于PCS直流侧。通过变流器的控制，超级电容可以抑制风电场的有功波动，同时能调节无功从而稳定并网电压，提高风电场的电能质量。文献[10]对超级电容和蓄电池的混合储能在独立式光伏系统中的应用进行了实验研究，结果表明，太阳电池在外界环境波动较大的情况下，混合系统的功率输出平稳，且蓄电池仍能稳定充电，提高了系统的利用率，减小了蓄电池的循环次数，提高了蓄电池的使用寿命。

为了说明超级电容对光伏发电的有功功率平抑作用，本文还利用Matlab/Simulink搭建了配有超级电容储能的分布式光伏发电系统，对其进行了仿真研究。

**4光伏发电有功平抑仿真**

4.1超级电容简化模型

因超级电容内部结构复杂，很难描述其动态特性，目前的模型都有局限性，且为了便于研究，本文采用了实际工程中采用模型，如图2所示：

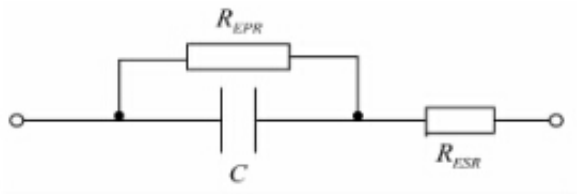



图2 超级电容工程实用模型

超级电容器等效为一个理想电容器C与一个较小阻值的电阻(等效串联阻抗RESR)相串联，同时与一个较大阻值的电阻(等效并联阻抗REPR)相并联的结构。C表征超级电容的容量；RESR表示内部发热损耗，同时对大电流起约束作用；REPR主要表征超级电容的自放电现象，反映的是超级电容器长时间保持静态储能状态时的静态损耗即漏电流效应。

超级电容器充放电时，表示静态损耗的并联等效电阻REPR通常被忽略，这样上述图2所示的实用模型可进一步简化为如图3所示的模型，即一个理想电容器与一个阻值较小的并联电阻RESR相串联。

图3 超级电容简化模型

4.2仿真模型

文中在Matlab/Simulink的基础上，采用图3所示的超级电容简化模型搭建以超级电容为储能的光伏发电系统，其中光伏发电系统的最大功率电压、电流分别为为283.2V和35.32A，额定容量为10kW，而超级电容的参数采用UCPY3000F的参数，单体电容容量3000F，额定电压2.7V，等效串联电阻为0.32mΩ，储存能量3.04Wh，选用1000只串联作为光伏发电系统的储能系统。

对光伏发电有功功率平抑的仿真结果如下所示：

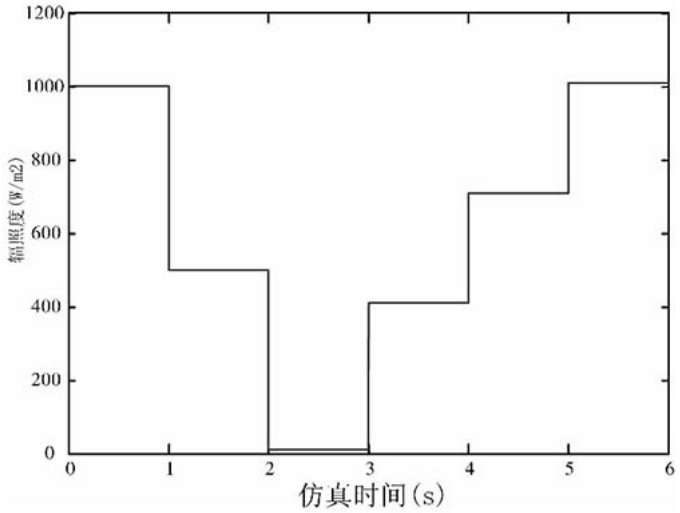



图 4　辐照度变化曲线

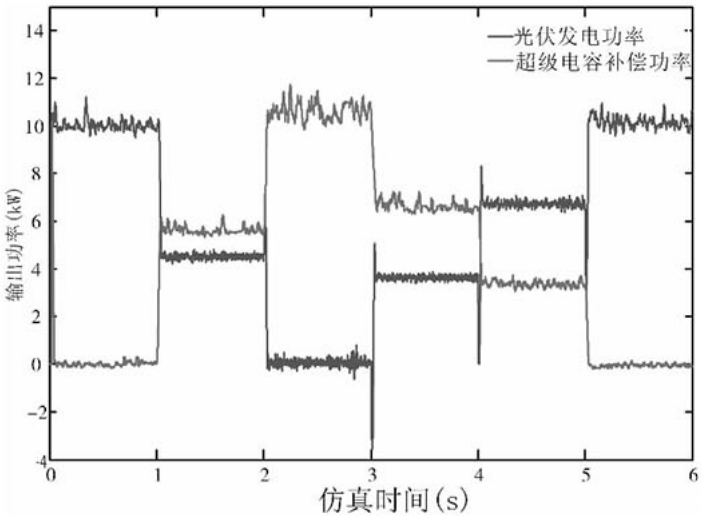



图 5　随辐照度变化的光伏和储能输出功率曲线

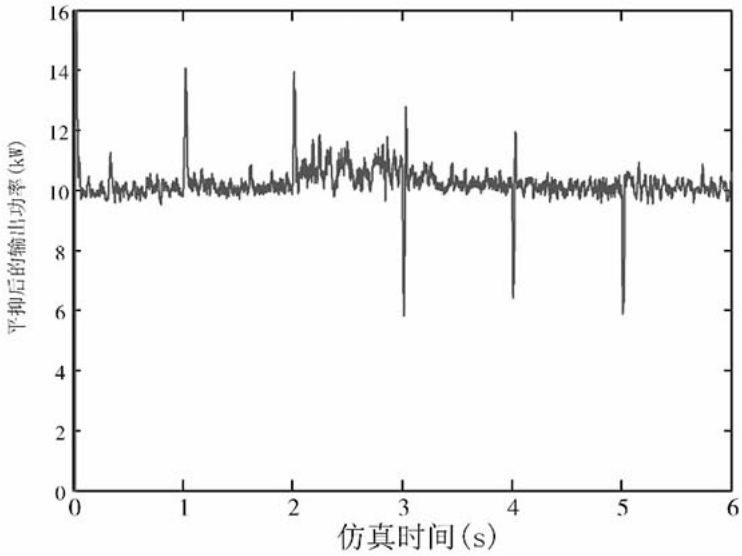



图 6　有功平抑后的输出功率

如图4所示为辐照度快速变化的曲线，图5中蓝色曲线为对应的光伏发电曲线，可知光伏发电功率随辐照度波动地厉害，而绿色曲线则为储能系统对其的补偿功率，由图可知两者功率恰好互补，使得平抑后的功率曲线如图6所示始终能维持在光伏发电系统的额定输出功率左右。由仿真结果可知，超级电容对光伏发电能达到削峰填谷、平抑输出的作用。

**5结束语**

文中先对超级电容的工作原理、运行特点、充放电特性作了介绍，然后讲述了超级电容在电力系统中的主要应用：

代替电容器应用在高压变电站及开关站的电容储能式硅整流分合闸装置中，作为储能装置；以APF(Active Power Filter，电力有源滤波器)拓扑为基础，并联在其直流侧，利用本身的快速充放电来补偿负荷的功率波动和电压波动，起到负荷电能质量调节器的作用；用于分布式能源的储能系统，利用其输出(吸收)功率密度高的特点平抑分布式能源发电的随机性和波动性等。为了说明对分布式能源发电的平抑作用，还利用Matlab/Simulink仿真软件搭建了的超级电容的简化模型，对超级电容用作储能系统来平抑分布式光伏系统发电功率进行了仿真，结果验证了超级电容做为储能确实能够对分布式发电功率起到削峰填谷的作用。

参考文献：

[1]陈英放，李媛媛，邓梅根.超级电容器的原理及应用[J].电子元件和材料，2008，27(4)：6－9.

[2]杨盛毅，文方.超级电容器综述[J].现代机械，2009，4：82－84.

[3]李霄，胡长生，刘昌金，等.基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J].电力系统自动化，2009，33(9)：86－90.

[4]尹忠东，朱永强.基于超级电容储能的统一负荷质量调节器的研究[J].电工技术学报，2006，21(5)：122－126.

[5]王云玲，曾杰，张步涵，等.基于超级电容器储能系统的动态电压调节器[J].电网技术，2007，31(8)：58－62.

[6]国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化，2013，37(1)：3－8.

[7]范伟.超级电容器直流电源的研制及应用[D].保定：华北电力大学，2007.

[8]林根德.超级电容在可再生能源系统中的应用及评价[D].合肥：合肥工业大学，2012.

[9]张燕萍.基于纳米碳及其金属氧化物复合电极的超级电容研究[D].上海：华东师范大学，2010.

[10]王思杰，惠晶.混合储能的独立光伏系统充电控制研究[J].电力电子技术，2012，46(1)：13－15.

[11]刘海波.电力电子变压器控制策略研究[D].武汉：华中科技大学，2009.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/93817.html