超级电容器在微电网中的应用

王鑫，郭佳欢，谢清华，黄伟

（华北电力大学电气与电子工程学院，北京102206）

摘要：随着可再生能源发电技术的发展，能够整合分布式电源的微电网是满足日益增长的电力需求、节省投资和提高能源利用效率的一种有效途径。储能系统作为微电网必要的能量缓冲环节，其作用越来越重要。概述了超级电容器的特征和性能，分析了超级电容器储能系统的结构和控制原理，并详细阐述了其在微电网中的应用。基于超级电容器的储能系统，不仅起到能量缓冲的作用，还能够提供短时供电、缓冲微电网中负荷波动、均衡微电源输出、改善微电网电能质量，并且对微电网的经济性能有重要作用。

0引言

当今社会对能源和电力供应的质量以及安全可靠性的要求越来越高,传统的大电网供电方式由于其本身的缺陷已经不能满足这种要求。能够集成分布式发电的新型电网——微电网应运而生，它能够节省投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性,是未来的发展方向。而作为微电网中必不可少的储能系统，发挥着十分重要的作用。超级电容器作为一种新型的储能器件，因为其无可替代的优越性，成为微电网储能的首选装置之一。

目前，在我国比较偏远的山区，架设输电线路的成本较高，而且即使架设了输电线路，运行成本也较高，因此实现电气化有一定的难度。如果利用风力或太阳能发电构建微电网，将电力转化为超级电容器的电场能储存起来，待需要时再将电场能转换为电能供电是非常经济的，而且不会对环境产生任何破坏。

对于我国大部分农村地区，电网可靠性往往不高，难免出现短时停电，然而提高可靠性需要的成本过高。可以在负荷集中区域建立微电网，在电力正常供应时通过超级电容器储能系统将电力储存起来，而在停电时由超级电容器储能系统供电。即使在我国较发达的城市地区，超级电容器储能系统也具有重要的作用。超级电容器储能系统在电力充足时将电力储存起来，而在电力供应不足时回馈给电网，保证电网负载始终是均衡的。同时，超级电容器储能系统可以改善电能质量，取代目前使用的UPS，提高重要负载设备如通信设备、计算机和医疗设备等的供电可靠性。

由此可见，既经济可靠又对环境友好的超级电容器储能系统是大有市场前景的，研究超级电容器储能系统在微电网中的应用也符合对环境保护的要求。太阳能、风能和燃料电池等无污染能源储存在超级电容器中,适时提供电能,不需要投资大的发电站,也不需要复杂的输送电网,是一种投资少、又能有效应用可再生能源的节能措施。

1超级电容器储能

1.1超级电容器的特性

超级电容器（super capacitor），又叫双电层电容器(Electrical Double-Layer Capacitor)、黄金电容、法拉电容，是介于传统电容器和充电电池之间的一种新型储能元件，其容量可达几百至上万法，比功率是电池的10倍以上，储存能力比普通电容器高，具有工作温度范围广、可快速充放电、循环寿命长、无污染、零排放等特点。

1）具有超高的容量。超级电容器的容量最大可做到上万法拉，比同体积的电解电容器容量大2000～6000倍。

2）具有极高的功率密度。超级电容器的功率密度可达到18kW/kg左右，可以在短时间内放出几百到几千安的电流。这个特点使得超级电容器非常适合用于短时间高功率输出的场合。

3）充放电速度快。超级电容器不产生化学反应，可以直接将电力贮存起来，充电所需的时间非常短。超级电容器充电可采用大电流充电，能在几十秒到数分钟内完成充电过程，是真正意义上的快速充电。而蓄电池则需要数小时完成充电，采用快速充电也需要几十分钟。

4）使用寿命长。超级电容器半永久性使用，无需更换。传统的充电电池经过多次充电和放电后，电解液逐渐分解、材料变质，性能也随之下降，用上几年后大都需要更换。超级电容器充放电过程中发生的电化学反应都具有良好的可逆性，可反复进行充放电数十万次以上，基本上无需更换。

5）环境温度对正常使用影响不大。使用温度范围广,低温性能优越，可达-40～+85°C。而电池仅为0～+40°C。

当然，超级电容器也有其缺点。如果使用超级电容器不当，会造成电解液泄漏等现象。超级电容器不可应用于高频率充放电的电路中，高频率的快速充放电会导致电容器内部发热，容量衰减，内阻增加，在某些情况下会导致电容器性能崩溃。当超级电容器进行串联使用时，存在单体间的电压均衡问题。单纯的串联会导致某个或几个单体电容器过压，从而损坏这些电容器，整体性能受到影响。

1.2与其它储能元件的比较

表1是超级电容器与蓄电池、超导储能以及飞轮储能的性能比较。蓄电池技术成熟、价格低，但其循化寿命低、污染环境，即将被新型环保的储能元件取代。飞轮储能、超导储能和超级电容器均为优秀的储能元件，是未来的发展方向，它们具有类似的特性，都可以应用于微电网中。超导储能、飞轮储能可以用于快速补偿，但其功率密度比超级电容器低得多，效果要差一些。和其他储能方式相比，超导储能价格昂贵，除了超导本身的费用外，维持低温所需要的费用也相当可观。而飞轮储能受到转速及机械强度的限制。

表1　各储能系统的性能比较[9,6]

元件名称	蓄电池	超级电容器	超导储能	飞轮储能
能量密度/(W·h·kg⁻¹)	20~100	1~10	< 1	5~50
功率密度/(W·h·kg⁻¹)	50~200	7 000~18 000	1 000	180~1 800
循环寿命/次	103	>106	106	106
效率η/%	80~85	> 95	90	90~95
安全性	高	高	低	不高
维护量	小	很小	大	较大
对环境影响	污染	无污染	无污染	无污染
成本/pu	1	8	20	4

在微电网中，由负荷或者微电源导致的电能质量问题往往具有持续时间短、出现频繁的特点。相比较而言，作为短期储能装置，超级电容器更为理想,因此，主要考虑超级电容器在微电网中的应用。虽然目前超级电容器价格依然偏高，但随着价格的逐渐下降，超级电容器作为一种高效、实用、环保的能量存储装置，必然会成为理想的选择。

2超级电容器运行及控制原理

2.1超级电容器储能系统的结构

超级电容器储能系统的基本结构如图1所示。超级电容器多为双电层结构，其活性炭电极和电解质之间是空间分布式结构，可用多个电容器的串并联描述超级电容器的特性。

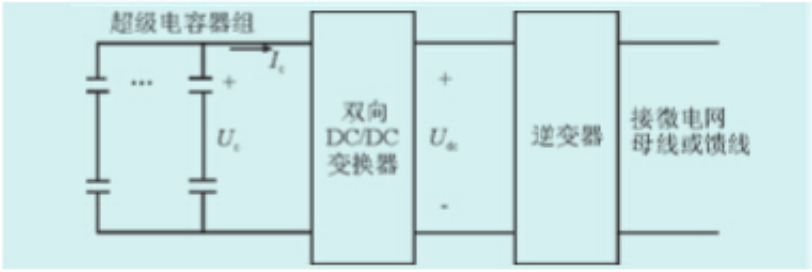


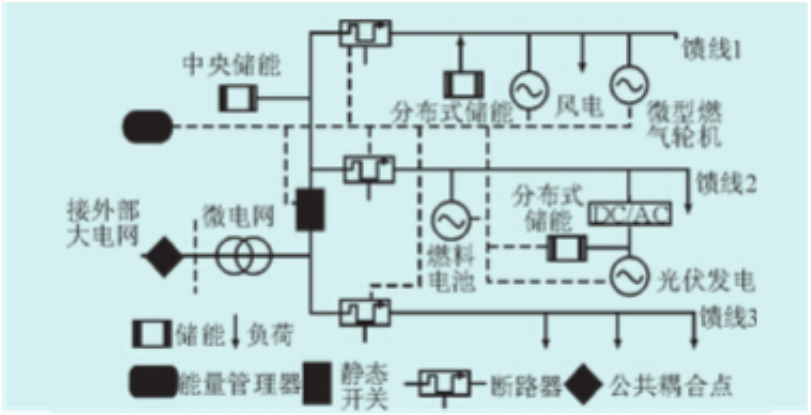
图1　超级电容器储能系统结构示意图

在超级电容器组充放电过程中，端电压范围变化大，通常必须采用DC/DC变换器作为接口电路来调节超级电容器的储能和释能。DC/AC变换器可采用双向DC/AC逆变器，或者采用AC/DC整流器及DC/AC逆变器。超级电容器储能系统并联在微电网中母线或者馈线上。

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。超级电容器本身的优点使得它在应用于分布式发电时，在与其它储能方式的互相竞争中胜出。

2.2超级电容器在微电网中的运行

图2是微电网的一种典型的结构图。由图2可以看出，微电网由微电源、负荷、储能以及能量管理器等组成。储能在微电网中发生作用的形式有：接在微电源的直流母线上、包含重要负荷的馈线上或者微电网的交流母线上。其中，前两种可称为分布式储能，最后一种叫做中央储能。



当并网运行时，微电网内的功率波动由大电网进行平衡，此时储能处于充电备用状态。当微电网由并网运行切换到孤网运行时，中央储能立即启动，弥补功率缺额。微电网孤网运行时负荷的波动或者微电源的波动则可以由中央储能或者分布式储能平衡。其中，微电源的功率波动有2种平衡方式，即将分布式储能和需要储能的微电源并联接在某馈线上，或者将储能直接接入该微电源的直流母线上。

2.3超级电容器的控制原理

对超级电容器的控制主要体现在DC/DC变换器、DC/AC变换器的控制上。近年来，变换器控制技术发展迅速，由最早的开环控制发展到输出电压瞬时反馈控制，由模拟控制逐渐发展到全数字控制。当前的数字控制方法有数字PID控制、状态反馈控制、模糊控制以及神经网络控制等。其中，数字PID控制方法是工程实践中应用最广泛的控制方法。

双向DC/DC变换器实现直流低压侧超级电容器组与直流高压侧之间的能量转换。DC/DC变换器的控制目标不能简单设定为维持储能电容器直流高压侧电压恒定，同时还须满足超级电容器的功率限制，其控制框图如图3所示。

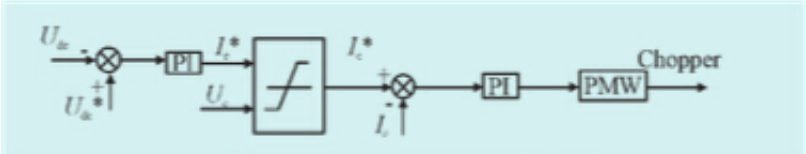


图3　DC/DC变换器的控制

DC/AC变换器目前存在多种控制方式。文献[9]提出一种采用dq0坐标的稳态模型，在此基础上设计了PI控制器，实现了有功功率和无功功率的同时独立调节。文献[10]采用基于同步旋转坐标系的前馈补偿闭环控制，能有效地抑制电压暂降问题。文献[11]提出基于模糊-规则的智能控制系统，利用预测的风电功率，储能装置的效果及交流电压的测量，用来调节、整定功率水平，实现对微电源运行的优化。

3超级电容器在微电网中的应用

3.1提供短时供电

微电网存在两种典型的运行模式：正常情况下，微电网与常规配电网并网运行,称为并网运行模式；当检测到电网故障或电能质量不满足要求时,微电网将及时与电网断开从而独立运行,

称为孤网运行模式。微电网往往需要从常规配电网中吸收部分有功功率，因而微电网在从并网模式向孤网模式转换时，会有功率缺额，安装储能设备有助于2种模式的平稳过渡。

3.2用作能量缓冲装置

由于微电网规模较小，系统惯性不大，网络及负荷经常发生波动就显得十分严重，对整个微电网的稳定运行造成影响。我们总是期望微电网中高效发电机（如燃料电池）始终工作在它的额定容量下。但是微电网的负荷量并非整日保持不变，相反，它会随着天气变化等情况发生波动。为了满足峰值负荷供电，必须使用燃油、燃气的调峰电厂进行高峰负荷调整，由于燃料价格很高，这种方式的运行费用太昂贵。

超级电容器储能系统可以有效地解决这个问题，它可以在负荷低落时储存电源的多余电能，而在负荷高峰时回馈给微电网以调整功率需求。储能系统作为微电网必要的能量缓冲环节，其作用越来越重要。它不仅避免了为满足峰值负荷而安装的发电机组，同时充分利用了负荷低谷时机组的发电，避免了浪费。

超级电容器功率密度大、能量密度高的特性使它成为处理尖峰负荷的最佳选择，而且采用超级电容器只需存储与尖峰负荷相当的能量。若采用蓄电池储能，需要存储几倍于尖峰负荷的能量。蓄电池曾经广泛用作储能单元，但是在微电网中需要频繁地进行充、放电控制，这样势必会大大缩短蓄电池的使用寿命。

在含有如电梯、提升机、地铁电站等恶性负荷的微电网中，配置超级电容器储能单元可以减少电力驱动系统对微电网的负面冲击影响。在负载侧有电动机或传动装置等强负载系统中，当大负载突然起动时，一般都需要一个很大的瞬间电流，这时，如果电源能量不足，电源电压将瞬间下降，从而使控制电路产生误操作，如果增大电源容量，对于平常不需大电流的工作场合来说，显然是一种浪费。而在系统中增加大功率超级电容器就可用较小容量的电源驱动较大的负载。

3.3改善微电网的电能质量

人们对电能质量问题日益关注。一方面，微电网作为电网要满足负荷对供电质量的要求，保证供电频率以及电压幅值变化、波形畸变率以及年停电次数等在一个很小的范围内；另一方面，大电网对微电网作为整体的并入电网也提出了严格的要求，如负荷功率因数、电流谐波畸变率和最大功率等都有严格限制。

储能系统对微电网电能质量的提高起到了十分重要的作用。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。由于超级电容器可快速吸收、释放大功率电能，非常适宜将其应用到微电网的电能质量调节装置中，用来解决系统中的一些暂态问题，如针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题，此时利用超级电容器提供快速功率缓冲，吸收或补充电能，提供有功功率支撑进行有功或无功补偿，以稳定、平滑电网电压的波动。

对于风力发电、光伏发电等不可控的微电源，发电机输出功率产生的波动会使电能质量下降。该类电源与储能装置

的结合是解决诸如电压跌落、涌流和瞬时供电中断等动态电能质量问题的有效手段之一。

3.4优化微电源的运行

绿色能源如太阳能、风能，其能量来源本身的特性，决定了这些发电方式往往具有不均匀性，电能输出容易发生变化。随着风力和太阳光强度的变化，这些能源产生的电能输出也会发生相应的变化。这就需要使用一种缓冲器来存储能量。由于这些能源产生的电能输出可能无法满足微电网峰值电能的需求，因此，可以采用储能装置在短时间内提供所需的峰值电能，直到发电量增大，需求量减少。

适量的储能可以在DG单元不能正常运行的情况下起过渡作用。如利用太阳能发电的夜间，风力发电在无风的情况下，或者其他类型的DG单元正处维修期间，这时系统中的储能就能起过渡作用，其储能的多少主要取决于负荷需求。

另外，在能源产生的过程是稳定的而需求是不断变化的情况下，也需要使用储能装置。燃料电池与风能或太阳能不同，只要有燃料，它就能够持续输出稳定的电能。然而，负荷需求随着时间的变化有很大不同。如果没有储能装置，燃料电池就要做得很大以满足峰值能量需求，成本显得过高。通过将过剩的能量存储在储能装置中，就可以在短时间内通过储能装置提供所需的峰值能量。与燃料电池等高能量密度的物质相结合，超级电容器能提供快速的能量释放，满足高功率需求，从而使燃料电池可以仅作为能量源使用。将超级电容器的强大性能和燃料电池结合起来，可以得到尺寸更小、重量更轻、价格更低廉的燃料电池系统。

3.5提高微电网的经济效益

储能系统的应用，对微电网经济效益的提供有重要意义：

1）大幅增加可再生能源的发电比例，缓解投资新的输电、配电线路、以及新建发电厂的压力，降低系统成本；

2）提供有效的备用容量，

改善电力品质（比发电机有更快的启动速度），改善系统的可靠度、稳定度；

3）提供有效的负载管理机制，降低尖峰时的供电成本，进而降低电价，提供经济效益；

4）在电力市场中，

储能系统能够大幅避免中断能源交易，以及预测错误带来的损失，进而提供稳定的电价；

5）不可调度的DG发电单元如太阳能、风能等，受天气等自然因素的影响比较大，DG单元拥有者不能制订一定的发电规划，但是有了能量储存，就可以在特定的时间提供所需的电能，而不必考虑此时DG单元能够发出多少电能，只需按照预先制定的发电规划进行发电。在电力市场的环境下，微电网与电网并网运行，有了足够的储存电力，微电网成为可调度的单元，微电网拥有者可以根据不同情况向电力公司卖电，提供调峰和紧急功率支持等服务，获取最大的经济效益。

4结语

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，如能大量应用于微电网中，必将推动技术进步，取得更大的经济效益。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/96289.html