

# 超级电容在微电网中的应用研究

张雷

(中国铁建重工集团有限公司 湖南长沙 410100)

**摘要:**由于可再生能源发电具有不稳定、不连续的特点以及大电网出现的瞬时故障都会引起微电网电压暂降、瞬时停电等问题,为保证微电网中电力用户的电能质量,在微电网中必需建设配套的储能系统。超级电容器作为一种新型的储能器件,因其无可替代的优越性,成为微电网储能的首选装置之一。本文从超级电容的基本原理入手,分析超级电容储能的特点,探讨超级电容在微电网中的作用,研究微电网中超级电容储能容量配比。

**关键词:**超级电容 储能 微电网 分布式发电

**中图分类号:**TM53

**文献标识码:**A

**文章编号:**1007-9416(2012)06-0076-03

## 1、引言

随着能源和环境问题的日益突出,发展低碳经济,建设生态文明,实现可持续发展已经成为人类社会的普遍共识,而开发清洁的可再生能源资源是世界各国经济和社会可持续发展的重要战略。同时,集中式大电网在过去数十年的快速发展过程中,也暴露出了成本高、运行难度大等弊端,难以满足用户越来越高的安全性和可靠性要求。

分布式发电技术是充分开发和利用可再生能源的理想方式,它具有投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点,可以对大电网提供有力补充和有效支撑。尽管分布式电源优点突出,但本身存在一些问题,例如接入成本高、控制困难等,同时由于分布式电源的不可控及随机波动性,其渗透率的提高也增加了电力系统稳定性的负面影响。分布式发电对大电网来说是一个不可控的电源,因此目前的国际规范和标准对分布式电源大多采取限制、隔离的方式处理,以减小其对大电网的冲击。IEEE P 1547标准规定:当电力系统发生故障时,分布式发电必须马上退出运行,大大限制了其效能的充分发挥。为协调大电网与分布式发电的矛盾,最大限度地发挥分布式发电技术在经济、能源和环境中的优势,微电网的概念应运而生。

微电网从系统的观点看问题,将发电机、负荷、储能装置及控制装置结合,形成一个单一可控的独立供电系统。采用电力电子技术,将微型电源和储能设备并在一起,直接接在用户侧。微电网可与大电网并网运行或独立运行,当大电网故障时,微电网与其解列并保持自身的正常运行。对大电网来说,微电网可被视为电网中一个可控的单元,可以在很短的时间内动作满足外部输电网络的需求;对用户来说,微电网可以满足他们特定的需求,如降低线损、增加供电可靠性,保持本地电压稳定、通过余热提高能量利用效率等。

微电网中可再生能源发电具有不稳定、不连续的特点,再加上大电网出现的瞬时故障也会引起微电网电压暂降、瞬时停电等问题,为保证微电网中电力用户的电能质量,在微电网中必需建设配套的储能系统。超级电容器作为一种新型的储能器件,因其无可替代的优越性,成为微电网储能的首选装置之一。

## 2、超级电容储能概述

### 2.1 超级电容基本原理

超级电容器又称超大容量电容器、金电容、黄金电容、储能电容、法拉电容、电化学电容器或双电层电容器,是靠极化电解液来储存电能的新型电化学装置。超级电容器根据电化学双电层理论研制而成,属于双电层电容器,是世界上已投入量产的双电层电容器中容量最大的一种。原理可用两块导电极板之间夹有绝缘材料层的平板型电容结构来说明,当在两极板之间施加电压时,极板上就会有电荷逐渐存起来,它所存储的能量可表示为,其中,为绝缘介质;为绝缘介质的体积;为绝缘介质的承受的电场强度。单位体积所储能量即储能密度,可表示为。由此可见,提高介电常数和电场强度,即可提高电容器的储能密度。超级电容结构如图1所示。

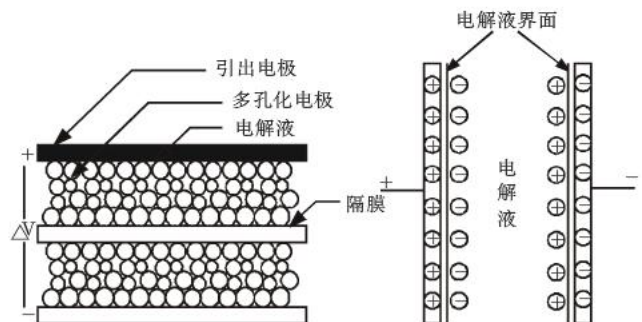


图1 超级电容结构

超级电容器通常包含双电极、电解质、集流体、隔离物四个部件,利用活性炭多孔电极和电解液组成的双电层结构获得超大的容量。当外加电压加到超级电容器的两个极板上时,与普通电容器一样,极板的正极板存储正电荷,负极板存储负电荷,在超级电容器的两极板上电荷产生的电场作用下,在电解液与电极间的界面上形成相反的电荷,以平衡电解液的内电场,这种正电荷与负电荷在两个不同相之间的接触面上,以正负电荷之间极短间隙排列在相反的位置上,这个电荷分布层叫做双电层,因此电容量非常大。随着超级电容器放电,正、负极板上的电荷被外电路泄放,电解液的界面上的电荷相应减少。由此可以看出:超级电容器的充放电过程始终是物理

表1 各储能系统的性能比较

电池种类	容量密度/(Wh/kg)	功率密度/(W/kg)	循环寿命/次	充放电效率/%	安全性	维护量	对环境的影响
铅酸	35~50	75~300	500~1500	0~80	高	小	污染
镍镉	70	150~300	2500	0~70	不高	小	无污染
锂离子	150~200	200~315	1000~10000	0~95	不高	大	无污染
超级电容	1~10	7000~18000	>1000000	>95	高	很小	无污染

过程,没有化学反应。因此,与利用化学反应的蓄电池不同,其性能是稳定的。

### 2.2 超级电容的特点

超级电容是近十几年随着材料科学的突破而出现的新型功率型储能元件,它具有电阻很小、寿命超长、安全可靠、储能巨大、充电快速的特点。

(1)功率密度高。超级电容器的内阻很小,且在电极/溶液界面和电极材料本体内部均能够实现电荷的快速贮存和释放,因此它的输出功率密度高达18千瓦/千克,是任何一种化学电源都无法比拟的,是一般技术蓄电池的数十倍。

(2)充电速度快。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,充电10秒~10分钟可达到其额定容量的95%以上。

(3)循环使用寿命长。超级电容器深度充放电循环使用次数可达1~50万次,没有“记忆效应”,使用寿命是锂电池(Li-Ion)的500倍,是镍氢电池(Ni-MH)和镍镉电池(Ni-Cd)的1000倍,基本上不需要更换。

(4)绿色环保产品。超级电容器的原材料构成、生产、使用、储存以及拆解过程均没有污染,是理想的绿色环保电源。

(5)工作温度范围宽。超级电容可以在-40℃~+70℃温度范围内工作,性能优于蓄电池。一般蓄电池工作温度是0℃~+40℃(表1)。

## 3、超级电容在微电网中的应用分析

### 3.1 提供短时紧急供电

微电网存在并网运行和离网运行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,当电网故障时,微电网与电网解列从而独立运行。当并网运行时,微电网内的功率波动由大电网进行平衡,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,当微电网由并网运行切换到孤网运行时,超级电容储能立即启动,弥补功率缺额。

$$W=P \times t \quad (3-1)$$

由式(3-1)可以看出,要长时间地输出稳定的电能,就要求储能系统储存足够的能量。然而,目前建造超大容量的储能系统成本太高,另外,采用储能系统长时间作为微电网的供电电源也不理想。实际中,储能系统只是作为短时间的供电电源以维持常规电源故障时敏感负荷的电能供应。

### 3.2 优化微电源运行,提高微电网电能质量

由于超级电容器功率密度大、能量密度高,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。

微电网中的绿色能源如太阳能、风能,往往具有不均匀性,电能输出容易发生变化,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,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,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。而且采用超级电容器只需存储与尖峰负荷相当的能量。

由于微电网规模较小,系统惯性不大,网络以及负荷经常发生波动的情况就显得十分严重,对于整个微电网的稳定运行造成了一定的影响。针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题,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。

## 4、微电网中超级电容储能容量选择研究

在微网中,储能设备容量过大,则浪费资源,经济性差;储能设备容量过小,则起不到相应的作用。因此,选择合适的储能设备容量一般要满足两个要求:一是储能设备的容量应能够满足系统的需求,保证安全完成自己承担的责任。二是容量的选择应满足一定的经济性,在保证满足电网需要的情况下,容量越小越经济。

由于微网中的储能设备容量相对较小,经济性暂不考虑,只介绍满足第一条要求的选择方法。

(1)电源短时间故障,这时由超级电容为微电网中的敏感负荷(总容量设为 $P_m$ )提供电能。由于超级电容反应速度快,在其他微电源未工作之前(这段时间设为 $t_1$ ),这部分电能完全由超级电容提供。则超级电容的容量( $S_{qe1}$ )由式(4-1)给出:

$$S_{qe1}=P_m \times t_1 \quad (4-1)$$

(2)运行过程中,微电源突然由最大功率( $P_{max}$ )变为最小功率( $P_{min}$ ),在这种情况下,突然变化的功率要有储能设备进行平衡。设电源最长调整时间为 $t_2$ ,则储能设备的容量( $S_{qe2}$ )由式(4-2)给出:

$$S_{qe2}=(P_{max}-P_{min}) \times t_2 \quad (4-2)$$

从历史数据中获取运行经验,通过数据的统计和模式分类的方法得出典型日微电源功率曲线。

(3)补偿无功时,无功补偿容量 $\Delta Q$ 的大小,取决于电力负荷的大小 $P$ ,补偿前负荷的自然功率因数 $\cos \phi_1$ 以及要求补偿提高后的功率因数 $\cos \phi_2$ 值。这里我们取 $\cos \phi_2=0.98$ , $\cos \phi_1$ 为系统发生各种状况(各支路短路或断路)时的最小值,电力负荷则取系统电力负荷最大值 $P_{max}$ 。则储能设备的容量( $S_{qe3}$ )由式(4-3)给出:

$$S_{qe3}=P_{max}(tg \phi_1-tg \phi_2)t \quad (4-3)$$

所以,整个超级电容容量的选择过程如下:1)对系统进行分析,得到 $P_m, P_{max}, P_{min}, \cos \phi_1, \cos \phi_2$ 以及 $t_1, t_2$ ;2)将以上数据代入(4-1)(4-2)(4-3)式计算;3)取 $S_{qe1}, S_{qe2}, S_{qe3}$ ,其中较大者确定为超级电容的容量。

## 5、结语

为保证微电网中电力用户的电能质量,在微电网中必需建设配套的储能系统,超级电容器作为一种新型的储能器件,其功率密度大、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,其无可替代的优越性,成为微电网储能的首选装置之一。分析了当可再生能源发电不稳定、不连续以及大电网出现的瞬时故障引起的微电网电压暂降、瞬时停电等问题时,超级电容能够提供短时供电缓冲微电网中负荷波动以及均衡微电源输出,极大地改善了微电网的电能质量。本文最后还探讨了超级储能在微电网应用中容量选择的原则和一般方法,为超级电容在微电网的工程应用提供了一种设计依据。

### 参考文献

- [1]丁明,张颖媛,茆美琴.微网研究中的关键技术[J].电网技术,2009,33(11):6-11.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J].Power System Technology,2009,33(11):6-11.  
[2]苏玲,张建华.微电网相关问题及技术研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):235-239.

SU Ling,ZHANG Jian-hua. Study on some key problems and technique related to microgrid [J].Power System Protection and Control,2010, 38(19):235-239.

[3]张洋,李强.光伏-储能联合微网系统工程方案设计[J].电力系统保护与控制,2010,38(23):211-214.

ZHANG Yang, LI Qiang. Conceptual design for the project of microgrid system interconnected with photovoltaic generation & energy storage[J].Power System Protection and Control,2010,38(23):211-214.

[4]周念成.光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):119-123.

ZHOU Nian-cheng. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J].Power System Protection and Control,2010,38(14):119-123.

[5]陈伟,石晶.微网中的多元复合储能技术[J].电力系统自动化,2010,1(1):112-115.

Chen Wei, Shi Jing. Composite Usage of Multi-type Energy Storage Technologies in Microgrid [J].Automation of Electric Power Systems,2010,1(1):112-115.

[6]王成山,杨占刚.微网实验系统结构特征及控制模式分析[J].电力系统自动化,2001,25(12):53-56.

Wang Chengshan, Yang Zhangang. Analysis of Structural Characteristics and Control Approaches of Experimental Microgrid Systems[J].Automation of Electric Power Systems,2001,25(12):53-

#### .....上接第75页

[89] S.Gustafsson,R.Martin,& P.Vary,“Combined acoustic echo control and noise reduction for hands-free telephony,” Signal Process.,vol.64,Special Issue on Acoustic Echo and Noise Control, no.1,pp.21-32,Jan.1998.

[90] T.van Waterschoot,G.Rombouts,& M.Moonen,“MSE optimal regularization of APA and NLMS algorithms in room acoustic applications,” in Proc.Int.Workshop Acoust.Echo Noise Control, Paris,France,Sep.2006.

[91] J.Pongsiri,P.Amin,& C.Thompson,“Modeling the acoustic transfer function of a room,” in Proc.of the 12th Int. Conf. Math.Comput.Model.Sci.Comput.,Chicago,IL,Aug.1999,pp.44-51.

[92] A.P.Liavas & P.A.Regalia,“Acoustic echo cancellation:Do IIR models offer better modeling capabilities than their FIR counterparts,” IEEE Trans.Signal Process.,vol.46,no.9,pp.2499-2504,Sep.1998.

[93] L.S.H.Ngia,“Recursive identification of acoustic echo systems using orthonormal basis functions,” IEEE Trans. Speech Audio Process.,vol.11,no.3,pp.278-293,May 2003.

[94] J.Benesty,D.R.Morgan,& M.M.Sondhi,“A better understanding and an improved solution to the specific problems of stereophonic acoustic echo cancellation,”IEEE Trans.Speech Audio Process.,vol.6,no.2,pp.156-165,Mar.1998.

#### 作者简介

梁民 (Min LIANG, 1964—), 男, 1992年6月获电子与通信系

56.

[7]郑漳华,艾芊.微电网的研究现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2008,32(16):27-31.

ZHENG Zhanghua,AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospect in China[J].Power System Technology, 2008, 32(16):27-31.

[8]盛鹏,孔力,齐智平,等.新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J].继电器,2007,35(12):75-81.

Sheng Kun, Kong Li, Qi Zhi-ping, et al.A survey on re-search of microgrid—a new power system[J].RELAY,2007,35(12):75-81.

[9]屈伟平,林燕.智能微电网中的超级电容技术[J].上海电气技术,2009,2(4):59-62.

QU Weiping,LIN Yan. Super Capacitor Technology in Intelligent Microgrid[J].Journal of SHANGHAI Electrical Technology,2009,2(4):59-62.

[10]刘伟,康积涛,李珊,崔军飞.超级电容储能技术在分布式发电系统中的应用[J].华电技术,2010,32(12):32-33.

#### 作者简介

张雷 (1982—), 男, 助理工程师, 主要从事电力设备的应用与研究。

统专业博士学位。1996年4月-1998年1月为美国普渡 (Purdue) 大学博士后研究员; 1998年2月-2001年2月为美国朗讯科技贝尔实验室 (Lucent Bell Labs) 研究员; 2001年3月-2007年4月为美国杰尔系统 (Agere Systems, Inc.) 高级研究员; 2007年5月-2007年10月为美国LSI集团高级研究员; 2007年11月-2010年3月为英飞凌科技 (Infineon Technologies) 北美公司高级主任工程师; 2010年4月至今为中国广州蓝钛东方科技发展有限公司首席技术专家和副总经理。在国内外学术杂志和会议上已发表论文40余篇, 获国防科工委进步二等奖和三等奖各一次, 已申报欧美国际专利13项, 其中已批7项, 待批6项。研究方向为语音/音频/视频信号处理, 宽带无线接发技术, CDMA/OFDM无线收发系统。

叶剑民 (1964—), 男, 1985年7月于国防科技大学通信工程专业获工学学士学位。1985年8月至今在国防科学技术大学电子科学与工程学院工作, 现任副研究员。曾主持并参加“高逼真度雷达目标中视频信号模拟器与雷达目标及其背景信号控制仿真软件包”、“雷达性能综合自动测试系统测距分系统目标模拟器”、“MNQ-4型雷达中频信号模拟器”、“遥科学通信与数据管理仿真系统”、“跟踪雷达中频模拟系统”、“战场电磁环境生成系统”、“高动态直接序列扩频数字接收技术”和“军用通信系统中高性能语音增强与均衡器”等项目的研制, 获全军科技进步一等奖一次、二等奖三次和三等奖两次, 国防科工委科技进步二等和三等奖各两次。研究方向为信号处理与通信工程。

\* 通讯作者: 叶剑民。