

风光互补发电蓄电池超级电容器混合储能研究

李少林, 姚国兴

(华南理工大学电力学院绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:提出一种风光互补发电中的超级电容器与蓄电池混合储能系统,充分利用蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的优点,大大提升了储能系统的性能。建立了混合储能系统的模型和控制环节,并进行实验,结果表明,在发电功率和负载功率脉动时,蓄电池能够工作在优化的充放电状态,有效减少了充放电循环次数,延长了使用寿命,提高了系统的工作效率。该系统对解决新能源发电系统中储能问题,具有十分重要意义。

关键词:超级电容器; 蓄电池; 风光互补; 混合储能

中图分类号: TM53

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2010)02-0012-03

Research on Ultracapacitor/Battery Energy Storage in Wind/Solar Power System

LI Shao-lin, YAO Guo-xing

(Guangdong key laboratory of Clean energy technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A complementary scenery generation of super-capacitor and battery hybrid energy storage system is presented, it makes full use of the high density of batteries energy and high power density, long cycle life advantages of super capacitors, the performance of energy storage system is enhanced greatly. Hybrid energy storage system and control aspects of the model are set up. The results show that in the landscape of power generation and load power pulse, battery can work in the optimization of charge-discharge state and reduce the charge-discharge cycles effectively, the battery life is extended and the efficiency of entire system is improved. It has great significance to solve the energy storage problem in new energy power generation system.

Keywords: ultracapacitor; battery; wind/solar hybrid; hybrid energy storage

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.60534040)

1 引言

电能的储存及管理在风光互补发电系统中很重要。目前,在该系统和光伏发电系统中常用的储能装置是铅酸蓄电池,但它存在如循环寿命短、功率密度低、维护量大等一些难以克服的缺点,占整个发电系统成本很高,而风光互补发电系统存在输入能量极不稳定,间隙性大等特性,会导致蓄电池过早失效或容量损失,进一步加大了发电系统的成本,这是风光互补发电系统亟待解决的问题。

超级电容器是一种新型储能器件,它兼有常规电容器功率密度大、充电电池能量密度高的优点,可快速充放电且寿命长,表现出卓越的储能优势^[1]。但目前超级电容器的能量密度偏低,实现大容量储能较为困难。若将超级电容器与蓄电池混合使用,使蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的特点相结合,将会大大提高储能系统的性能。超级电容器与蓄电池并联使用,能增大储能系统的功率,降低蓄电池内部损耗,延长放电时间,增加使用寿命,还可缩小储能装置的体积^[2]。以风光互补发电中超级电容器蓄电池混合储能系统为研究对象,分

析其模型、控制策略和运行特性。通过实验研究了系统效率、混合储能系统充放电效率以及对系统的稳定性作用和对负载的平滑能力。

2 系统的结构

风光互补发电系统受气候等自然因素的影响,其发电输出功率具有不稳定和不可预测性,主要表现为输出电流的波动。充电电流过大,蓄电池会发生极化现象,会使极板活性物质脱落,还会使温升和出气加重。同样,大电流放电会使蓄电池极板弯曲变形,过大电压跌落会导致蓄电池不正常关断。此外,由于发电功率的间断或不足,蓄电池常处于充放电电流小的状态,加快了老化进程,缩短了循环使用寿命^[3]。配置一定容量的超级电容器,并通过控制器控制超级电容器向蓄电池的能量流动过程,可充分发挥超级电容器功率密度大的优点,优化蓄电池的充放电电流;还可利用超级电容器的储能能力,减少充放电循环次数。基于此,提出基于超级电容器蓄电池混合储能的风光互补发电系统,其结构如图 1 所示。

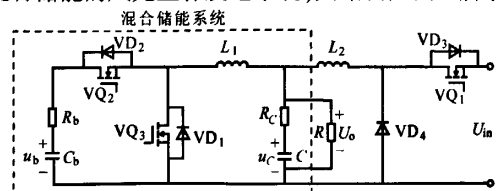


图 1 风光互补发电混合储能系统结构图

基金项目:国家自然科学基金项目(60534040)

定稿日期:2009-08-03

作者简介:李少林(1982-),男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为功率电子变换技术和新能源发电系统。

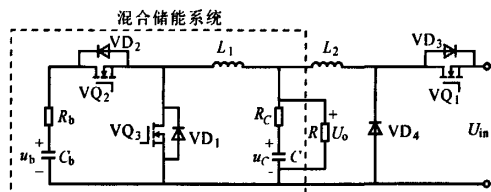
超级电容器与蓄电池的并联方式一般有直接并联、通过电感器并联以及通过功率变换器并联3种。前两种为无源式结构,第3种为有源式结构。有源式储能结构中,系统配置和控制设计上有一定的灵活性,有效提升了储能系统的性能,在此主要对有源式结构进行分析和研究。

3 系统模型分析及控制策略

3.1 模型分析

为简化分析,可将蓄电池简化为理想电压源,超级电容器简化为理想电容器与其等效内阻串联结构。因主要研究系统动态性能,所以对其并联的等效内阻可不予考虑。

超级电容器与蓄电池通过 Buck-Boost 型双向功率变换器并联,输入电压 U_{in} 通过 Buck 电路给储能系统供电。图 2 示出系统等效模型。



R_b, R_c 分别为蓄电池和超级电容器的等效阻抗
 u_c 为超级电容器端电压; R 为负载电阻

图 2 系统等效模型

超级电容器与蓄电池通过 Buck-Boost 型功率变换器并联,以电感电流 i_L, u_c 为状态变量,负载为输出变量,设功率开关管占空比为 D ,则在开关管导通时有:

$$L \frac{di_L}{dt} = Du_c - DRi_L, \quad C_b \frac{du_c}{dt} = i_L \quad (1)$$

在开关管关断时间有:

$$L \frac{di_L}{dt} = -U_o, \quad C_b \frac{du_c}{dt} = i_L - \frac{U_o}{R} \quad (2)$$

可得:

$$L \frac{di_L}{dt} = Du_c - DRi_L, \quad C_b \frac{du_c}{dt} = i_L - \frac{U_o}{R} \quad (3)$$

应用状态平均法,对基本变量施加扰动,可得到输出小信号传递函数,为:

$$\left. \frac{\hat{U}_c(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{U}_c(s)=0} = \frac{RD^2 - (s + R_c/2)L}{LCRDs^2 + D(RR_cC + L)s + R_cD + RD^3} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{U}_c(s)=0} = \frac{RCs + 2}{LCRs^2 + (RR_cC + L)s + R_c + D^2} \quad (5)$$

对控制电感电流的开环传递函数进行分析,无论储能系统工作在 Buck 工作模式还是 Boost 模式,传递函数的极点皆位于左半平面,即系统开环传递函数是稳定的。

3.2 系统的控制策略

蓄电池与超级电容器并联连接,并联控制器主

要任务是控制充放电电流、放电深度、循环工作次数等。因此,对其控制过程的设计是系统的关键,要综合考虑多方面因素的影响,如混合储能装置的容量配置、气候条件、负荷状况等,重点考虑因日照强度和风力大小等环境因素的变化所导致的发电功率的波动,以及负载功率脉动对蓄电池的影响。

在控制系统中共有 3 路信号采集,即蓄电池端电压、超级电容器端电压和电感电流。系统采用双环控制,外环电压环通过采样负载输出电压,与参考电压比较得到误差信号,内环电流环通过采样输入电流与电流环给定值相比较,经电流环的 PI 调节器产生变化的占空比,通过调节 PWM 来控制功率开关管^[4]。控制器系统模型如图 3 所示。

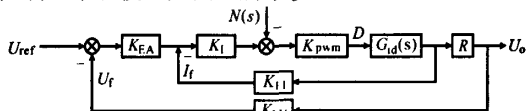


图 3 控制器系统模型

图 4 示出系统能量控制电路,通过它判断系统处于哪种工作模式,并向 Buck-Boost 型双向变换器发出合适的选通信号 U_{on} 和关断信号 U_{off} ,确保双向变换器工作在合适模式,从而实现系统的能量管理。当 $U_{Cmin} > u_c$ 且 $u_b < U_{bmin}$ 时,输出信号 U_{on} 与 U_{off} 均为高电平,此时电路立即进入关断模式;当 $U_{Cmin} < u_c < U_{Cmax}$ 且 $u_b < U_{bmin}$ 时, U_{on} 与 U_{off} 均为低电平,此时电路选通 Buck 工作模式,超级电容器给蓄电池充电;当 $U_{Cmin} < u_c < U_{Cmax}$ 且 $u_b > U_{bmin}$ 时, U_{on} 为高电平, U_{off} 为低电平,此时电路选通 Boost 工作模式。为避免在切换点高低电平之间来回切换,实际实验中采用滞环比较控制^[5]。

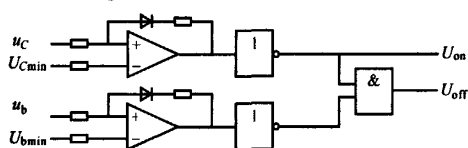


图 4 能量控制电路

为了达到预期效果,结合储能系统的实际,设计电路中采用 DSP TMS320LF2407 为中央控制芯片, DSP 具有强大的数据运算和处理能力,即使在复杂的控制中,控制效果仍接近连续系统,实时计算当前 PWM 占空比,以实现该混合储能系统的实时控制。图 5 示出控制系统结构图。

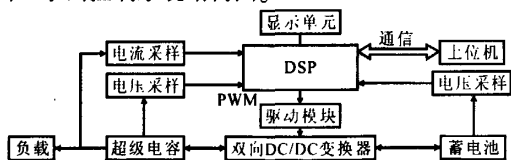


图 5 控制系统结构图

采用这种控制策略,可以充分发挥超级电容器能量密度大、功率密度大、储能效率高、循环寿命长

等优点。当风力发电机和太阳能电池的发电功率很大时,超级电容器吸收大部分电能并储存起来,并在系统输出功率低时释放出来;当负载功率发生脉动时,超级电容器通过控制器系统及时输出电流,使蓄电池的充电过程不受影响。这样,可使蓄电池始终处于优化的充放电工作状态,受外界因素的影响很小,改善了蓄电池的工作环境,减少了蓄电池的充放电次数,延长了蓄电池使用寿命。

4 实验结果及分析

为验证提出的风光互补发电系统中蓄电池超级电容器混合储能的合理性及科学性,构建了超级电容器蓄电池混合储能的风光互补发电系统。参数如下:蓄电池容量为 15 000 F;蓄电池内阻为 0.2 Ω;超级电容器容量为 2 000 F;超级电容器内阻为 0.02 Ω;电感 $L_1=L_2=0.2\text{mH}$ 。图 6 示出实验波形。

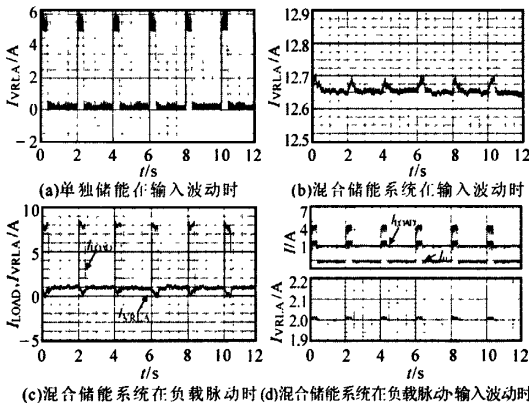


图 6 蓄电池响应的实验波形

图 6a 示出当该风光互补发电系统蓄电池作为单独储能装置,输入电流波动时蓄电池的响应。由图可见,输入电流波动对蓄电池电流的影响很大。图 6b 示出超级电容器、蓄电池混合储能系统中,输入电流波动时蓄电池的响应。由图可知,虽然输入功率发生了较大的波动,但由于超级电容器是高功率密度,对脉动电流有一定的平滑作用。图 6c 示出超级电容

器、蓄电池混合储能系统中,负载脉动时蓄电池的响应,可见,当负载脉动时,因为超级电容器承担了大部分负载电流,蓄电池波动比较小。图 6d 示出风光互补发电系统中,输入功率和输出功率都有较大的波动时蓄电池的响应。不难看出,蓄电池的输出电流虽有一定的波动,但波动不是很大,超级电容器和蓄电池混合储能系统能起到平滑的作用,基本上能够达到预期的效果。

5 结论

提出一种应用于风光互补发电系统中的超级电容器和蓄电池混合储能系统,并通过一个并联的 Buck-Boost 型 DC/DC 变换器传输能量。分析其数学模型,证明超级电容器在该风光互补发电系统中的作用,并在此基础上提出一种简单实用的混合储能系统的控制方法。最后,通过实验证明,在负载脉动和输入波动较大时,超级电容器都能起到一定的滤波作用,蓄电池的充放电电流能够保持在较平滑的水平,减少了蓄电池的充放电次数,延长了蓄电池的使用寿命,同时也提高了整个系统的工作效率。相信随着技术的不断进步,混合储能技术将在新能源发电系统、电动汽车等领域得到广泛的应用。

参考文献

- [1] GAO L, DOUGAL R A, LIU S. Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(1): 236-243.
- [2] Thoms Eilinger. Super-Capacitor Energy Storage Unit for Elevator Installations [P]. United States Patent, US 6742630B2.1, 2004.
- [3] 欧阳名三. 独立光伏系统中蓄电池管理的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [4] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.
- [5] 蔡宣三, 张占松. 开关电源的原理与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接第 9 页) 专题的征文范围包括: ①数字 PWM 控制的基础理论, 含数字 PWM 控制系统延迟、极限环振荡等问题的分析和建模等研究; ②数字 PWM 控制器设计和实现技术, DPWM 结构, ADC 等; ③DC/DC 变换器数字 PWM 控制技术; ④UPS 及其它电压型逆变器数字控制技术研究于应用; ⑤PFC 电路及 PWM 整流器的数字控制; ⑥风电及太阳能发电逆变器数字控制算法及控制器实现; ⑦数字控制技术在运动控制中的应用; ⑧基于数字控制的电能管理和通信技术; ⑨数字 PWM 控制的其它研究和应用。

欲投稿的作者请在 2010 年 9 月 30 日前将论文寄到本刊编辑部 (email: dldzjstg@163.com), 并注明“数字 PWM 控制技术”字样。所投论文将按本刊常规评审程序请国内同行专家评审。评审结果将于 2010 年 10 月 30 日前通知作者。本刊将请西安交通大学杨旭教授为该专辑的特邀主编, 对该领域的研究及该专辑的论文进行分析与点评。

截稿日期: 2010 年 9 月 30 日 录用通知发出日期: 2010 年 10 月 30 日

论文刊登期号: 2010 年第 12 期 (2010 年 12 月 20 日出版)

作者: [李少林](#), [姚国兴](#), [LI Shao-lin](#), [YAO Guo-xing](#)
 作者单位: [华南理工大学电力学院绿色能源技术重点实验室](#), 广东, 广州, 510640
 刊名: [电力电子技术](#) **ISTIC** **PKU**
 英文刊名: [POWER ELECTRONICS](#)
 年, 卷(期): 2010, 44(2)
 被引用次数: 1次

参考文献(5条)

- GAO L, DOUGAL R A, LIU S [Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid](#) 2005(1)
- Thoms Eilinger [Super-Capacitor Energy Storage Unit for Elevator Installations](#) 2004
- 欧阳名三 [独立光伏系统中蓄电池管理的研究](#) 2004
- 张方华, 朱成花, 严仰光 [双向DC-DC变换器的控制模型](#) [期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2005(11)
- 蔡宣三, 张占松 [开关电源的原理与设计](#) 2004

相似文献(10条)

- 期刊论文 [李韶杰](#) [超级电容器蓄电池混合电源的建模与性能分析](#) -[蓄电池](#)2010, 47(2)
 超级电容器与蓄电池的混合电源能充分发挥蓄电池比能量大和超级电容器能快速充电/放电、循环寿命长的优点, 可显著降低电源的内部损耗, 提高电源的运行时间. 本文建立了超级电容器蓄电池混合电源的数学模型, 系统地分析了影响超级电容器与蓄电池混合电源内部损耗和运行时间的因素. 分析结果表明: 超级电容器与蓄电池混合电源的内部损耗和运行时间与脉动负载的占空比、脉动负载的周期、超级电容器的内阻、蓄电池的内阻、超级电容器的容量、超级电容器的并联支路数有密切的关系.
- 期刊论文 [李韶杰](#) [超级电容器蓄电池混合电源性能研究](#) -[电源技术](#)2010, 34(6)
 超级电容器蓄电池混合电源能充分发挥蓄电池比能量大和超级电容器快速充电、循环寿命长的优点, 能显著提高电源的峰值输出功率. 建立了超级电容器蓄电池混合电源的数学模型, 系统地分析了影响超级电容器蓄电池混合电源峰值输出功率的因素, 并通过实验对超级电容器蓄电池混合电源的峰值输出功率性能进行了验证. 分析和实验结果表明: 超级电容器蓄电池混合电源的峰值输出功率与脉动负载的占空比、脉动负载的周期、超级电容器的内阻、蓄电池的内阻、超级电容器的容量、超级电容器的并联支路数有着密切的关系. 超级电容器蓄电池混合电源的峰值输出功率比蓄电池有了显著的提高.
- 期刊论文 [唐西胜, 齐智平](#), [TANG Xi-sheng, QI Zhi-ping](#) [超级电容器蓄电池混合电源](#) -[电源技术](#)2006, 30(11)
 超级电容器与蓄电池混合使用, 可以充分发挥蓄电池比能量大和超级电容器比功率大、循环寿命长的优点, 大大提升混合电源的性能. 建立了蓄电池超级电容器并联的数学模型, 定量地分析了混合电源性能的改善及其影响因素. 对直接并联、通过电感器并联和通过功率变换器并联三种结构进行了研究和实验验证. 实验表明, 混合电源的功率输出能力大大提高了, 蓄电池的放电过程得到了优化; 通过功率变换器的并联结构具有较好的效果和实用性.
- 期刊论文 [梁琦, 郭巍](#), [LIANG Qi, GUO Wei](#) [超级电容器结合蓄电池在航空地面直流电源上应用的可行性分析](#) -[蓄电池](#)2006, 43(1)
 介绍了超级电容器的特性和航空地面电源的供电特性, 并在此基础上对超级电容器结合蓄电池在航空地面电源上应用的可行性进行了仿真分析, 揭示了超级电容器结合蓄电池使用的良好性能以及在航空地面电源应用的可行性.
- 学位论文 [唐西胜](#) [超级电容器储能应用于分布式发电系统的能量管理及稳定性研究](#) 2006
 双层次超级电容器兼具蓄电池能量密度大和电解电容器功率密度大的优点, 循环寿命长、储能效率高、充放电速度快、高低温性能好、环境友好, 具有卓越的储能潜力. 本文以光伏系统为例, 研究了超级电容器储能以及超级电容器蓄电池混合储能应用于分布式发电系统中的应用; 并探讨了超级电容器对分布式电力系统小信号稳定性的改善作用.
 介绍了太阳能电池及光伏系统的特性, 给出了一种基于dD dP的最大功率点跟踪控制策略及其理论依据. 介绍了超级电容器工程用等效电路模型, 构建了超级电容器储能独立光伏系统, 并进行控制环节和能量管理过程设计. 仿真及实验表明, 超级电容器的充放电效率高达92.5%, 所用的MPPT方法具有较好的跟踪速度和精度, 系统在光伏发电功率波动和负载功率脉动时, 呈现出良好的稳定性.
 建立了超级电容器蓄电池直接并联储能的等效模型, 针对脉动负载, 分析了储能系统的性能改善及其影响因素. 对三种混合储能结构进行了理论分析、仿真和实验.
 在有源式混合储能结构中, 采用了一种蓄电池近似恒流放电控制策略, 蓄电池只以脉动负载的平均功率输出, 放电过程具有明显的优化效果.
 提出了将超级电容器蓄电池混合储能应用于光伏等分布式发电系统, 以优化蓄电池的充放电过程. 将光伏阵列及充电控制器等效为脉动电流源, 分析了混合储能的响应. 提出了一种无源式混合储能方案, 可以较好地优化蓄电池的充放电过程. 给出了一种有源式混合储能方案, 并提出了一种蓄电池优化充电控制策略. 对两种储能结构进行了仿真分析和实验验证.
 分析了混合储能的技术经济性. 驱动脉动负载时, 蓄电池的输出电流峰值远小于负载的脉动电流峰值, 可以减少蓄电池组的配置容量, 降低安装成本. 利用超级电容器的储能能力和并联控制器的变流控制作用, 可以减少蓄电池的充放电小循环次数, 减小放电深度, 延长蓄电池的使用寿命, 降低运行成本.
 探讨了直流分布式电力系统的小信号稳定性问题. 分析了恒功率负载的负阻性以及各种功率模块之间较强的相互作用对系统稳定性的影响. 介绍了稳定性的阻抗分析法, 包括稳定禁止区域、阻抗规范, 以及稳定裕度的测试等. 超级电容器的等效源阻抗很小, 本文提出, 将超级电容器与系统中的直流母线并联, 以降低源输出阻抗, 使系统环路增益的奈氏曲线远离禁止区域, 从而提高稳定性或带载能力. 并以光伏系统的实例分析证实了可行性.
- 期刊论文 [唐西胜, 李海冬, 齐智平, 李云虎](#), [Tang Xisheng, Li Haidong, Qi Zhiping, Li Yunhu](#) [有源式超级电容器-蓄电池混合储能系统的研究](#) -[高技术通讯](#)2006, 16(12)
 建立了基于功率变换器的有源式超级电容器-蓄电池混合储能系统的模型, 并对控制环节进行了设计, 提出了一种在脉动负载下蓄电池恒流输出的控制

策略. 对该模型进行了实验, 并与无源式储能结构的性能进行了比较, 结果表明, 有源式混合储能系统配置灵活, 能够大大提升系统的性能和优化蓄电池的工作过程, 非常适合于负载功率脉动, 尤其是瞬时功率很高, 但平均功率较低的应用场合. 最后, 给出了确定有源式混合储能系统中超级电容器技术参数和容量配置的依据.

7. 学位论文 [马建业](#) 混合储能技术在变电站直流系统中的应用研究 2008

超级电容器作为一种新型电力储能技术, 由于其动态响应速度快, 储、释能效率高, 被认为是一种非常有前途的电能存储器件. 超级电容器直流储能单元是超级电容器储能系统中最为关键部位, 其可靠工作对提高超级电容器储能系统的效率和能量利用率, 增强储能系统的可靠性具有重要的意义. 本文立足于超级电容器直流储能单元的研究与应用设计, 建立了超级电容器与蓄电池直接并联储能的等效模型; 针对脉动负载, 分析了储能系统的性能改善及其影响因素. 对超级电容器应用于直流电源, 研究了基于超级电容器单独储能和基于超级电容器和蓄电池混合储能的直流电源系统两种方案, 通过一系列的试验, 验证了超级电容器应用于直流电源系统的可行性, 具有一定的理论意义和实用价值.

8. 期刊论文 [唐西胜](#), [齐智平](#), [TANG Xi-sheng](#), [QI Zhi-ping](#) 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 -[电工电能新技术](#)2006, 25(3)

超级电容器与蓄电池混合使用, 可以充分发挥蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长的优点, 大大提升储能系统的性能. 针对独立光伏系统的特点, 设计了一种有源式混合储能方案, 建立了系统的模型和控制环节. 实验结果表明, 在光伏发电功率和负载功率脉动时, 蓄电池能够工作在优化的充放电状态, 并能够有效地减少充放电小循环次数. 为解决光伏等可再生能源系统中的储能问题, 具有现实可行性.

9. 会议论文 [李中奇](#) 双性极板与超级电池详解 2009

本文论述了超级蓄电池与超级电容器现状与发展态势, 并分析了基本原理, 介绍了其开发的过程, 探讨了用双极性极板生产的双极性蓄电池的水平, 讨论了超级蓄电池制造技术与现行蓄电池企业接轨的可行性.

10. 期刊论文 [唐西胜](#), [武鑫](#), [齐智平](#), [Tang Xisheng](#), [Wu Xin](#), [Qi Zhiping](#) 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究 -[太阳能学报](#)2007, 28(2)

建立了混合储能系统的数学模型, 对系统性能的提升进行了定量分析. 提出了一种无源式并联储能方案, 并应用于独立光伏系统中, 仿真和实验结果表明, 在光伏系统的发电功率和负载功率脉动的情况下, 蓄电池的充放电电流比较平滑. 合理配置超级电容器组的容量, 可以减少由于日照量变化所导致的蓄电池充放电小循环次数. 为解决光伏等可再生能源系统中蓄电池储能的问题, 具有现实意义.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dldzjs201002005.aspx

授权使用: 哈尔滨理工大学(heblgdx), 授权号: 4e5fe9cd-18d2-41fd-b989-9e2400e9aad8

下载时间: 2010年11月4日