

阶梯式快速混合储能系统设计及控制策略研究

刘振宇¹, 马民², 马辉栋¹, 王海婷², 路志明¹

(1. 山西农业大学信息科学与工程学院, 山西 太谷 030801; 2. 山西农业大学工学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 针对微风、弱光条件下, 风能、太阳能发电系统中储能设备效率低的问题, 提出超级电容器阶梯式快速储能模型, 并以超级电容器和锂电池为基本储能元件设计了阶梯式快速混合储能系统。基于超级电容器快速充放电的特点, 将多个超级电容器串联, 设计了一种阶梯式快速储能设备。利用锂电池能量密度大的特点, 将阶梯式快速储能设备与锂电池结合, 设计实现了一种阶梯式快速混合储能系统。该系统可实现充电、控制、保护和显示等功能。经过试验验证, 该系统可解决风力、光伏发电机在微风、弱光状态下, 电池低电压运行的储能问题, 有效提高了微能的利用率。

关键词: 超级电容器; 阶梯式; 储能; 控制策略; 测试

Storage system and control strategy research of stepwise and fast storage energy

LIU Zhenyu¹, MA Min², MA Huidong¹, WANG Haiting², LU Zhiming¹

(1. Institute of Information Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. Institute of Technology, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of energy storage devices of wind energy and solar power generating system under the condition of breeze and weak light, a model of stepwise super capacitor to storage energy rapidly is proposed, and a stepwise hybrid energy storage system which takes lithium battery and super capacitor as the basic energy storage components is designed. Based on the feature of super capacitor charge and discharge, an energy storage device is designed by setting multiple super capacitor in series connection. Using the feature of high energy density of lithium battery, this paper designs and implements a device combining stepwise fast storage system with lithium battery. This system realize the functions such as charging, controlling, protection, displaying and so on. The test verifies that the system can solve energy storage problem in low voltage operation under the condition of breeze and weak light and enhance the effectiveness of micro power source of utilization.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050217), National Natural Science Foundation of China (No. 31371527), and Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 2013011033-1).

Key words: super capacitor; stepwise; energy storage; control strategy; test

中图分类号: TK82 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)09-0069-07

0 引言

随着环境的恶化和化石资源的短缺, 利用风能、太阳能等无污染、可再生新型能源发电受到越来越多的认可和关注。但是, 这两种发电方式往往受到风力强度和光照强度的限制, 因此, 解决如何有效利用微风、弱光等微能进行储能发电的问题, 对于

改善微电网的电能质量和运行性能具有重要意义^[1]。风力、光伏发电中常见的储能形式有飞轮储能、蓄电池储能和电容器储能等, 其中机械储能常受到转速和机械强度的限制, 蓄电池寿命较短^[2]。超级电容器具有优良的脉冲充放电性能和大容量储能性能, 其功率密度大、质量轻、无污染、可多次充放电, 是一种新型的储能装置, 近年来受到国内外科学家的广泛重视^[3]。张步涵等^[4]利用串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用, 实现了改善电网分布的电能质量的稳定性。李军徽等^[5]利用超级电容器混合储能保护蓄电池, 提高储能的

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050217); 国家自然科学基金(31371527); 山西省自然科学基金(2013011033-1)

技术经济性及其控制策略的有效性。彭思敏等^[6]提出了大型蓄电池储能系统接入的实现形式及其控制策略,保证公共供电点电压和频率的稳定,谐波含量小,满足供电要求。桑丙玉等^[7]研究了混合储能的拓扑结构和控制策略的优缺点。基于以上研究,超级电容器对储能的功率、能量变化有很好的技术经济性^[8],但关于在微风和光照强度低时,小型风力机和太阳能光伏板工作在低电压状态时的储能目前尚没有相关文献。

本文针对微能状态下小型风力发电机储能问题,提出超级电容器阶梯式快速储能模型,设计并实现了超级电容器与锂电池相结合的混合储能系统,实现了微风发电和太阳能微光条件下的储能。通过仿真和试验,验证了阶梯式快速混合储能及控制策略的可行性和有效性。

1 超级电容器的数学模型

超级电容器是上世纪70、80年代发展起来的一种新型储能器件,具有容值大、功率密度高、充放电速度快、工作温度范围宽、循环寿命长和无污染等优点,性价比高、发展空间大,是风力、太阳能发电中较为理想的储能器件^[9]。

本文对超级电容结构简单地理解为利用电极和电解液之间形成的界面双电层电容来存储能量,我们采用图1、图2所示的超级电容器充放电模型。图1所示为德拜极化电池充电模型, R_0 为分离电阻,其大小决定于双电层电容器电解质导电率以及电极材料表面积; R_{ct} 为电荷转移电阻, C_a 为吸附电容,温度将决定其值的变化^[10-11]。图2所示为超级电容器放电等效模型。超级电容器处在放电状态时,负载一般被等效为阻值为 R 的电阻。 $u(t)$ 为超级电容器短路电压, $u_c(t)$ 为超级电容器理想等效电容的电压, $i_c(t)$ 为电容器放电电流。

本文超级电容器的基本能量是这样选定的:按LVRT要求给定的整个低压工况期间,以可储存于系统的全部定额能量作为基本能量。储能器件的规格 E_{LVRT} 可按LVRT曲线以上和0.9 p.u.以下所界定的面积计算。

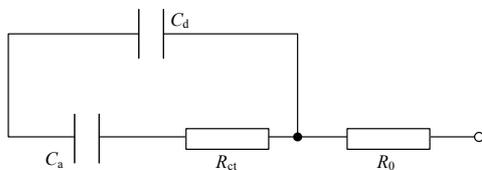


图1 超级电容器充电等效电路

Fig. 1 Charge equivalent circuit of super-capacitor

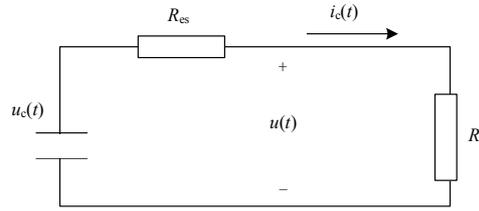


图2 超级电容器放电等效电路

Fig. 2 Discharge equivalent circuit of super-capacitor

$$E_{LVRT} = P_{base} [(0.9 - V_{min})t_1 + 0.5(t_2 - t_1)(0.9 - V_{min})] \quad (1)$$

式中: P_{base} 为基本功率; V_{min} 、 t_1 、 t_2 见图3所示LVRT特性图。由此,可确定故障期间必须管理的能量。假定横跨储能器件的最高电压为 $V_{dc.ref}$ (直流电压基准值),需求的电容值则按式(2)求得。

$$C_{ess} = 2E_{LVRT} / V_{dc.ref}^2 \quad (2)$$

式中, C_{ess} 为超级电容器组的等值电容。

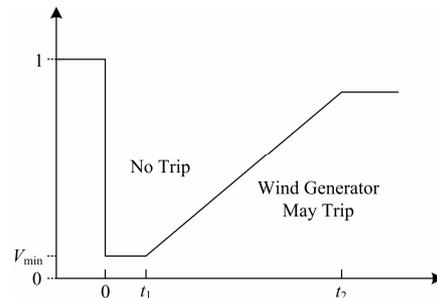


图3 典型的LVRT特性

Fig. 3 Typical characteristics LVRT

储能系统若允许改变整定点,延长储能器件利用的时间标度,从而使储能的效益最大化,但此时只能稍微放弃输出功率的固定调节,通过管理系统的正确设计,消减或提升微风储能功率基准值,针对储能调节的方法进行管理,对于风力发电,调节当地能源,时间标度效率最大化来提升功率基准值,这样才可以使储能器件接近保持储能的上限或下限运行。

2 阶梯式快速储能系统电路设计

本设计主要采用单片机来完成对阶梯式快速混合储能系统的充电、控制、保护和在线显示等功能。系统工作中,首先对各超级电容器充电,当各个超级电容器的电压达到某一值后实现对超级电容器的串联组合使其电压达到12V;然后对12V锂电池进行充电。阶梯式快速储能系统的整体结构框图如图4所示。

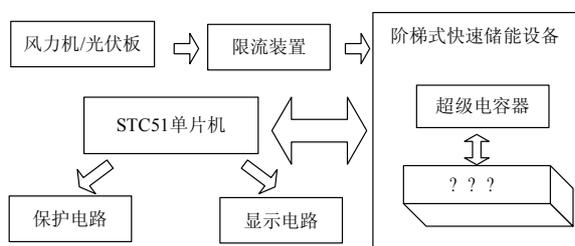


图 4 阶梯式快速混合储能系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of cascade energy storage system

2.1 阶梯式充电主电路

单个电容的充电电路如图 5 所示。单片机的输出端口为高电平时，光电耦合器 U1 导通，使三极管 Q1 也导通，这时场效应管 Q3 的栅极电压达到导通电压使场效应管 Q3 导通。由于三极管 Q1 的导通使其集电极变为低电平，这时三极管 Q2 也导通。这就使风力机或太阳能电池板发出的电通过三极管 Q2、二极管 D1、场效应管 Q3 对超级电容开始充电。当检测电路检测到超级电容的电压达到设定阈值时，单片机便将光电耦合器的输入端置为低电平，使三极管 Q2 的基极变为高电平，场效应管的栅极变为低电平，这时超级电容充电电路便被断开停止充电。

由于使用的超级电容器型号为 630F/2.5 V，而最终是给 12 V 蓄电池充电，需要 6 个相同的电容器

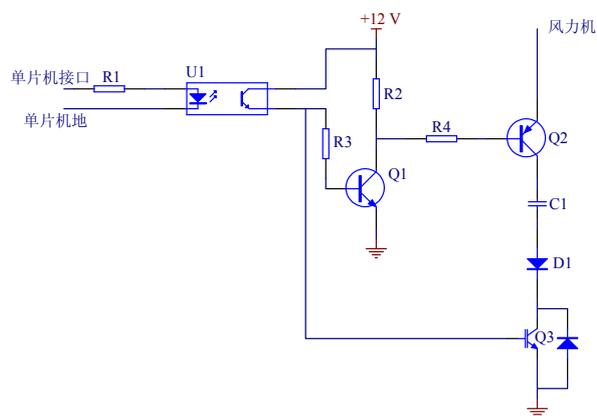


图 5 单个电容的充电电路

Fig. 5 A single capacitor charging circuit

相串联才能给蓄电池充电。充电过程中，六个超级电容的顺序充电通过控制多个开关的通断实现；充电电源在为单个电容充电时，电源与电容共地，控制此电容的开关亦与电容共地；由此，六个电容须共地，我们采用光电耦合器实现了六个电容依次与地相连。充电过程中，正负是互相变化的，电路中采用二极管，以防止在充电时各电容间形成寄生回路。考虑到电子开关管的功耗比继电器要小得多，控制电路中采用电子开关来控制电容器充电电路的通断。超级电容器的充电部分主电路如图 6 所示。

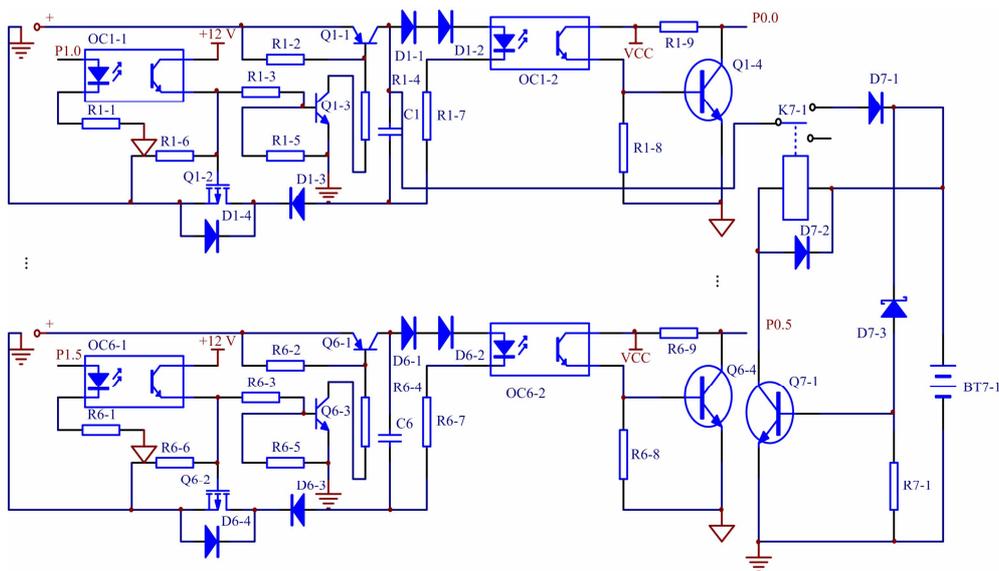


图 6 超级电容器的充电部分主电路图

Fig. 6 Partial diagram of main circuit for super capacitor charging

2.2 锂电池充电主电路

超级电容充电完成后经过串联，其总电压比锂电池的端电压稍高，这时其通过二极管 D1、继电器的常闭触点给 12 V 锂电池充电。当锂电池的端电压

达到其允许的最高电压时将使并联在其两端的稳压二极管 D3 击穿，这时三极管 Q1 的基极与发射极间电压达到导通电压 0.7 V，三极管 Q1 导通使继电器 K1 得电，其常闭触点将断开，使锂电池的充电电路

断开，起到保护锂电池的作用。锂电池的充电主电路如图 7 所示。

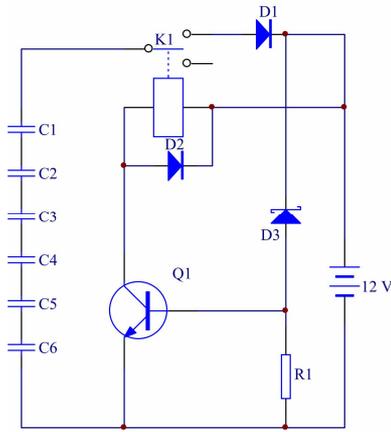


图 7 锂电池的充电主电路图

Fig. 7 Main circuit diagram of battery charging

3 阶梯式快速混合储能系统检测控制策略

阶梯式快速混合储能系统的检测控制可通过纯软件检测实现，也可通过由光电耦合器与二极管组成的电路实现。由纯软件实现的系统检测控制，是通过 A/D 转换器对各电容两端电压进行 A/D 转换^[12]，将结果送入 89C51 与预设值进行比较，当大于设定值时，充电主电切断，然后对下一电容进行充电。该方法基于软件实现，具有电容充电最大值易改变的优点，只要改变程序中设定值便可^[13]；但是，该检测控制电路中采用元器件较多，造成功耗较大，经实测，由于微风所需时间为 20 min，在这个过程中检测控制电路消耗电能为 360 J，也就是电容储存的能量与控制电路消耗的能量近乎相同，即设计毫无意义。由光电耦合器与二极管组成的检测控制电路采用了二极管来进行电容器电压的检测。该方式实现的系统检测控制使用元器件数量少，且每个元器件在电容未被充电到设定值时几乎不消耗电能^[14]；但是，该电路中，其充电最大值不易改变。基于以上考虑，我们采用光电耦合器、二极管组成的检测电路与软件相结合的检测方式，实现对系统的检测控制，其检测控制策略框图如图 8 所示。

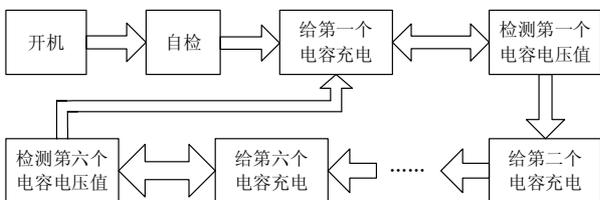


图 8 检测控制策略框图

Fig. 8 Block diagram of detection control strategy

由光电耦合器与二极管组成的检测控制电路如图 9 所示。当每个电容两端的电压为 2 V 时单片机切断其充电主电路，接通下一电容充电主电路；二极管采用硅管，在电容两端并联了三个二极管(包括光电耦合器中的发光二极管)；为防止电流过大造成光电耦合器的损坏，在二极管电路中串联一个电阻 R1；在充电过程中当超级电容两端的电压达到 2 V 时光电耦合器的发光二极管和光耦中三极管将导通^[15]，使与电阻 R2 连接的三极管 Q1 导通，使三极管的集电极电位为低电平；随即将这个电容的主电路断开，同时接通下一个电容的充电电路，对下一超级电容充电。

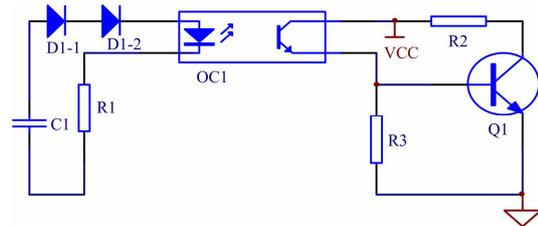


图 9 检测控制单元电路

Fig. 9 Circuit of detection control unit

系统检测控制电路，检测控制流程如图 10 所示。

(1) 主控程序设计。主要完成程序初始化，变量初始化以及一些端口的定义。定义 P0 口为超级电容充电完成信号输入端，P1 口为单片机切断电容充电主电路信号输出端。

(2) 充电控制程序。当电容器两端电压达到设定值时，其控制电路将 P0 口变为低电平，然后将 P1 口变为低电平，同时将下一路对应位置设为高电平，对下一电容器进行充电^[16]。

(3) 扰动消除程序。在电容充电过程中单片机端口可能会由于其电源不稳定或周围电场影响使其端口电位发生变化，使单片机发生误动作。设计中调用延时程序来消除该扰动。

4 系统电路试验验证

(1) 电容充电控制电路准确性测试

试验中先设定各电容两端充电电压为 2 V，即当电容两端电压达到 2 V 时控制电路就将其充电电路切断，给下一个电容充电，然后使用直流可调电源给电容充电，如图 11 所示为充电控制准确性测试电路图。

该图使用直流可调电源给电容充电，当检测到电容两端电压达到设定值时，蜂鸣器发声。其试验结果如表 1 所示。

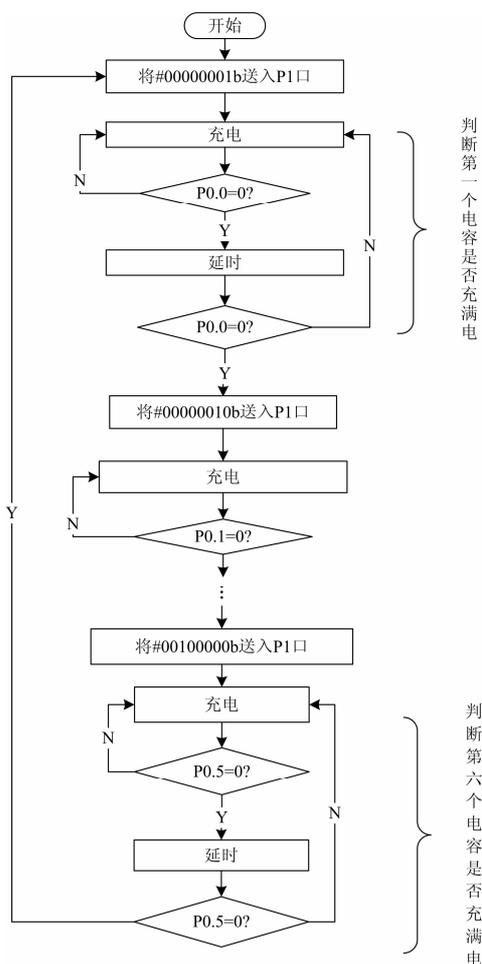


图 10 检测控制流程框图

Fig. 10 Detection and control processes

表 1 电容充电控制电路准确性测试表

Table 1 Accuracy test table for capacitor charging control circuit

电容器序号	1	2	3	4	5	6
电容所充电压/V	1.96	1.99	2.01	1.88	1.87	1.99
	1.95	1.97	1.98	1.86	1.88	2.03
	2.01	1.95	1.99	1.94	1.84	1.96

(2) 锂电池保护电路测试

试验中先将连接好的锂电池保护电路接到锂电池两端, 再用充电器给锂电池充电, 如图 12 所示, 观测锂电池两端电压变化, 观察其电压达到所允许最高电压时其保护电路能否将锂电池断开。测试表明保护电路可以正常工作。

(3) 设计充电最低电压测试

试验中用直流可调稳压电源来模拟低速运行的风力机, 将储能装置接到电源两端, 先将每个电容充电到 1 V, 然后调节电源的输出电压, 观测其开始充电的最低电压, 如图 13 所示, 测试数据如表 2 所示。

表 2 储能装置开始充电的最低电压

Table 2 Minimum voltage of storage device for start charging

测量次数	1	2	3	4	5
开始充电电压/V	1.9	2.3	2.5	2.0	2.8

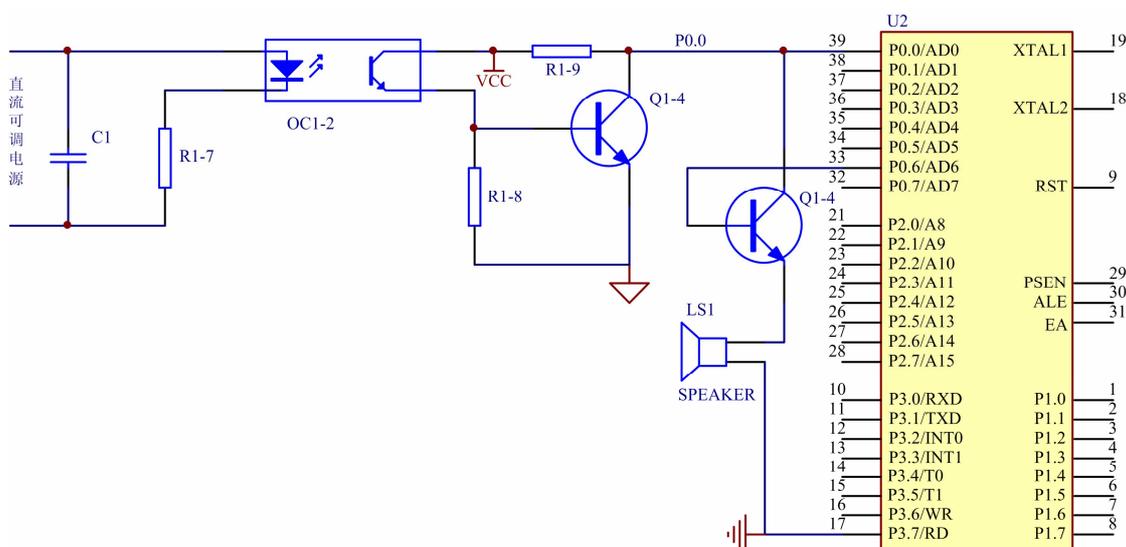


图 11 充电控制准确性测试电路图

Fig. 11 Circuit diagram of accuracy test of charging control

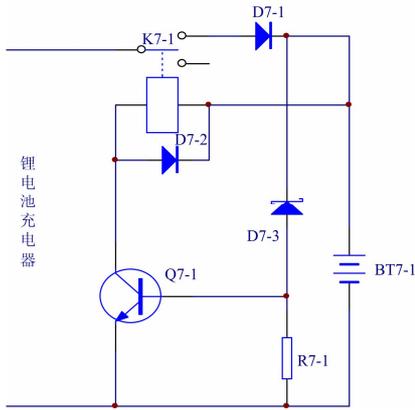


图 12 锂电池保护测试电路

Fig. 12 Test circuit of lithium battery protection

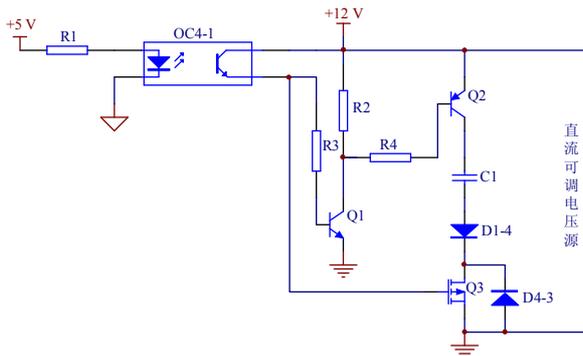


图 13 充电最低电压测试电路

Fig. 13 Test circuit of lowest charging voltage

5 结论

本文提出了超级电容器阶梯式快速混合储能模型，通过超级电容器阶梯式串联与锂电池储能相结合的方式，解决了微能状态下，因电压强度不够而导致的储能设备储能效率低的问题。经试验验证，该方案有效可行，可用于风力及太阳能发电系统，提高风力机和太阳能发电机对微能的利用。

电路设计中，通过对继电器与电子开关管的特性、功耗及其在充电过程中消耗的电能、电容所储存能量的比较，得出充电电路选用电子开关管；根据电容连接情况及控制过程中出现的问题，选用光电耦合器来实现单片机与充电主电路的隔离；根据本设计想要实现的超级电容的充电顺序设计出了由 ADC0809 实现的检测电路和由光耦与二极管实现的检测电路两种检测电路^[17]，通过实验对这两种检测电路运行时电流与功耗比较得出，选用光耦与二极管来实现电压检测较合理。

参考文献

[1] 邹和平, 周玮, 孙辉, 等. 基于超级电容器储能的双馈

风力发电机低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 48-52.

ZOU Heping, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Study on the low voltage ride through of doubly fed wind generator based on the supercapacitor storage[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 48-52.

[2] 黄宇淇, 方宾义, 孙锦枫. 飞轮储能系统应用于微网的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 83-87, 113.

HUANG Yuqi, FANG Binyi, SUN Jinfeng. Simulation research on the microgrid with flywheel energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 83-87, 113.

[3] 张莉, 吴延平, 李琛, 等. 基于超级电容器储能系统的均压放电控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 329-332.

ZHANG Li, WU Yanping, LI Chen, et al. Control strategy for balanced discharge based on supercapacitor storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 329-332.

[4] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.

ZHANG Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 1-4.

[5] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.

ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.

[6] 李海东, 齐智平, 冯之钺. 超级电容器电力储能系统的电压均衡策略[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 19-23, 34.

LI Haidong, QI Zhiping, FENG Zhiyue. Voltage balancing strategy for supercapacitor power storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 19-23, 34.

[7] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.

SANG Bingyu, TAO Yibing, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J].

- Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [8] 邓哲, 周峰武, 金灵辉, 等. 基于超级电容储能与自适应功率预测模型的电梯制动能量回收系统并网功率优化控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 2-10.
DENG Zhe, ZHOU Fengwu, JIN Linghui, et al. Power optimal control of elevator brake energy recovery system based on super-capacitor energy storage and adaptive power-prediction model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 2-10.
- [9] 任桂周, 常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-3.
REN Guizhou, CHANG Siqin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1-3.
- [10] 郭文川. 单片机原理与接口技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [11] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 78-79.
YANG Xiuyuan, LIANG Guishu. Development of wind power generation and its market prospect[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 78-79.
- [12] 杨俊华, 吴捷, 杨金明, 等. 现代控制技术在风能转换系统中的应用[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 530-540.
YANG Junhua, WU Jie, YANG Jinming, et al. Applications of modern control techniques in wind energy conversion system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(4): 530-540.
- [13] 张治安, 邓梅根, 胡永达, 等. 电化学电容器的特点及应用[J]. 电子元件与材料, 2003, 22(11): 2-6.
ZHANG Zhian, DENG Meigen, HU Yongda, et al. Characteristics and applications of electrochemical capacitors[J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22(11): 2-6.
- [14] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 李元春. 计算机控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [16] SIMON P, GOGOTSI Y. Materials for electrochemical capacitors[J]. Nature Materials, 2008, 7(11): 845-854.
- [17] 李志勇. 用德拜极化电池模拟双电层电容器性能的测试技术研究[J]. 电子质量, 2002(1): 135-138.
LI Zhiyong. Performance study of DLC using Debye polarization cell simulation[J]. Electronics Quality, 2002(1): 135-138.

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2015-01-26

作者简介:

刘振宇(1974-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事新能源发电及其储能的研究。E-mail: lzysyb@126.com

(编辑 魏小丽)