

超级电容器组均衡充电系统

杨威，杨世彦，黄军

(哈尔滨工业大学电气工程系，哈尔滨 150001)

摘要：串联超级电容器组中各单体能量维持均衡是安全使用并充分发挥电容器组性能的重要保证。在分析比较几种均衡充电方案的基础上，提出一种双电源结构的均衡充电系统，实现了充、放电全过程的能量均衡，可有效避免超级电容器单体的过充、过放，有利于提高电容器组能量存储效能，延长其循环使用寿命。简要介绍了充电电源缓冲式软开关Buck变换器和均衡电源半桥隔离变换器，并给出了以FPGA为核心的监控系统的结构以及软硬件设计方案。

1引言

超级电容器 (ultracapacitor) 是一种新兴的储能元件，它具有比功率大、充电速度快、充放电效率高、循环使用寿命长等突出优点[1]。虽然超级电容器能量密度小、成本较高，但仍不失为一种理想的城市公交电动客车能量源[2]。

超级电容器公交电动客车的充电系统必须满足充电快速性的要求，同时还要保证充放电时各单体的能量均衡[3]。快速充电系统有利于充分发挥超级电容器充电迅速的突出优点，使电动客车在终点站短暂停留时能快速得到能量补充，从而弥补其能量密度小导致行驶里程短的缺陷；充放电时保持各单体能量均衡是充分发挥超级电容器储能容量，防止各单体过充或过放的必要保证。

2均衡充电系统结构

公交电动客车选用的超级电容器有较好的容量一致性，可以以电压为依据来判断各单体的能量是否均衡。超级电容器在充放电时所表现出的特性与动力电池相似，因此可以借鉴一些针对动力电池提出的均衡充电方法，这些方法主要是保证各单体电压相等来维持其能量均衡。如文献[4-5]采用了如图1a所示的方法，利用DC/DC变换器在相邻的两个单体间建立能量转移的双向通道，相邻单体间能量均衡也就保证了整组单体的能量均衡；另外也可以采用飞渡电容建立能量交换通道[6]。文献[7]的方法是为每个单体配置一个DC/DC变换器，如图1b所示。它可以把单体多余的能量回馈到充电电源中，最终均衡地充入各单体中。文献[8]提出了类似的一种级联DC/DC方案。上述方法的缺陷是当串联的能量源单体数目较多时，需要提供大量的DC/DC变换器（或飞渡电容），使系统过于繁杂，可靠性降低。

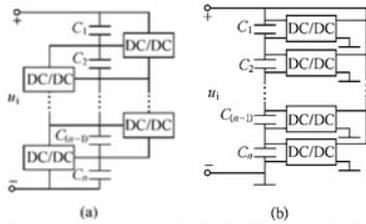


图 1 利用 DC/DC 变换器的均衡充电方案

Fig.1 Equalization circuit with DC/DC converter

采用多路输出 DC/DC 变换器的方案则可以解决上述问题。如图 2 所示，在为串联能量源充电的同时，利用多路输出 DC/DC 变换器对各单体进行补充均衡充电^[9]。文献[10]对该方案进行了改进，可使副边绕组数量减半，但多副边耦合变压器的设计仍有较大难度。

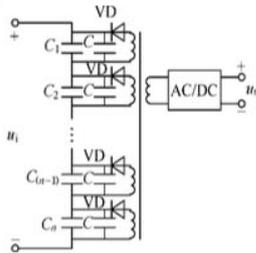


图 2 利用多路输出 DC/DC 变换器的均衡充电方案

Fig.2 Equalization circuit with multi-output DC/DC converter

上述方法都能实现均衡充电，但对能量源放电时如何保持各单体能量均衡考虑不多。在分析上述均衡充电方法的基础上，本文提出一种由充电电源、均衡电源组成均衡充电系统的方案，其总体框图如图 3 所示。其中充电电源为非车载式电源，可以输出大电流对串联的超级电容器组进行充电以满足充电快速性的要求，为了防止过充，采用恒流限压的电源输出特性控制；均衡电源为车载式电源，它以整组超级电容器为输入，通过投切网络在组内的各单体之间切换，对单体进行充电，其输出特性为先恒流后恒压。在用充电电源充电的同时，实时检测组内各超级电容单体的电压，当发现某一单体的电压比其他单体低且差值超过一定范围，就把均衡电源切换到该单体上，对其进行补充充电，该单体的充电电流增大，电压得以提高。均衡电源实质上是不断把整组超级电容器发出的能量补充给组中电压最低的单体，从而促进组内各单体的能量均衡。采用这种方案可以实现超级电容器组的快速均衡充电，而且由于均衡电源在车辆运行时继续工作，使超级电容器组在放电时也能保持各单体的能量均衡，有效防止过放。

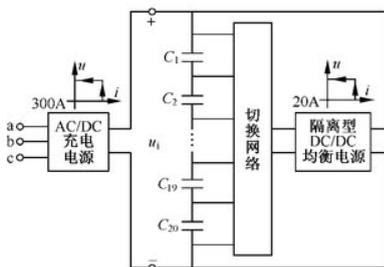


图 3 均衡充电系统总体框图

Fig.3 Framework of charge equalization system

3 充电电源

电动城市公交客车选用的超级电容器单体容量为167F,共20个,串联为一组,电压变化范围190~340V,充电电流为300A。大功率开关电源中,开关管的工作环境较差、开关损耗大,为此设计了带缓冲式软开关电路的Buck变换器作为充电电源,如图4所示。图中L₂、C₂分别是缓冲电感和缓冲电容。在开关管导通时,由于缓冲电感L₂的作用,开关管电流缓慢上升,主续流二极管VD₁的电流缓慢下降,实现零电流开通,这样开关管电压和电流交叉部分电流值小,相应地开通损耗也小。开关管导通期间,缓冲电容C₂被充电到电源电压值;当开关管关断时,电流通过C₂、VD₂续流,开关管的电流迅速减小,由于缓冲电容的作用,开关管两端的电压从零开始缓慢上升,这样开关管实现了零电压关断,相应地关断损耗减小。为了限制缓冲电容C₂的反向充电电压及加速缓冲电感L₂存储能量的泄放,由R₃、VD₃组成了快速泄放电路。加入缓冲式软开关电路以后,开关管的工作条件得以改善,开关损耗显著降低,提高了变换效率。为了抑制线路杂散电感引起开关管、二极管上的电压尖峰,设计了相应的吸收电路。

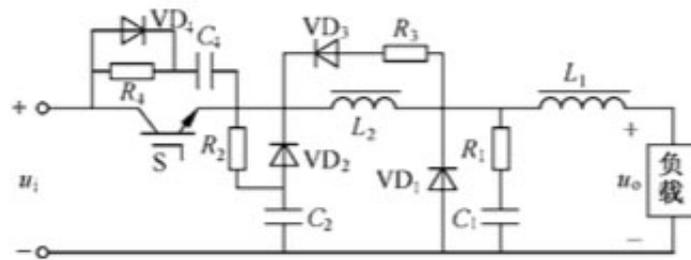


图4 充电电源主电路

Fig.4 Schematic diagram of charging power supply

4 均衡电源

均衡电源以整组超级电容器为输入,其输出可以通过切换网络来投切到组中任意一个单体上,整组电压约为单体电压的20倍,为此采用了带变压器隔离的半桥变换器,对输出和输入进行隔离,如图5所示。均衡电源采用MOSFET作为开关管,为了抑制开关管和副边整流二极管上的尖峰电压,分别设置了吸收电路R₃、C₃和R₄、C₄。考虑到超级电容器组的充放电电流在几百安培左右,过大的均衡充电电流会对电容器组正常充放电造成影响,因此均衡电源的最大输出电流为20A。为了确保充电安全,均衡电源采用了先恒流后恒压的输出特性。在未达单体的额定电压值时,均衡电源输出恒定电流,当充电到额定电压值后,电源输出恒定电压防止单体过充造成损坏。均衡电源控制电路采用了SG3525,利用芯片内部的误差放大器构成电压环,实现恒压输出;利用芯片8脚的软启动功能,配合相应的外部电路构成电流环,实现恒流输出。

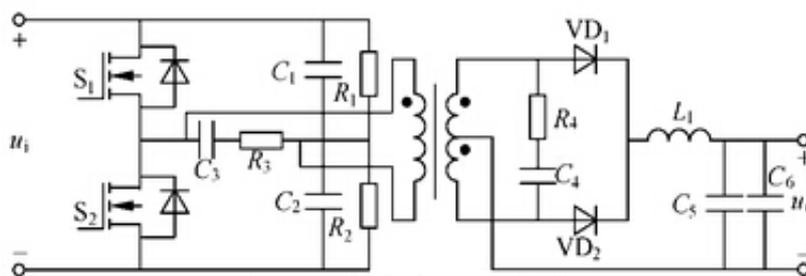


图5 均衡电源主电路

Fig.5 Schematic diagram of equalization power supply

5 巡检监控系统

巡检监控系统是整个均衡充电系统的核心控制部分,它负责实时监控各单体的电压,控制切换网络把均衡电源投入到组内相应单体上,促进整组的能量均衡。总体框图如图6所示,主要由基于现场可编程逻辑阵列FPGA的控制器、电压采样电路和均衡电源切换网络组成。

利用FPGA现场可编程功能可以实时改变电路系统,从而可以实现不同的控制策略以满足巡检监控系统的需要。基于FPGA的控制器控制整个监控系统的运行,首先控制多路开关的切换,依次采集各单体电压,然后控制A/D转换器

将其变为数字量，经过处理后发出驱动信号驱动切换网络，把均衡电源投切到相应的单体上。超级电容器组最高电压达到340V，较高的共模电压使得在单体两端直接跨接差分放大器的方法无法应用，因此采用电阻分压的方法。利用继电器矩阵构成均衡电源切换网络，使用的继电器个数较少可以提高可靠性。

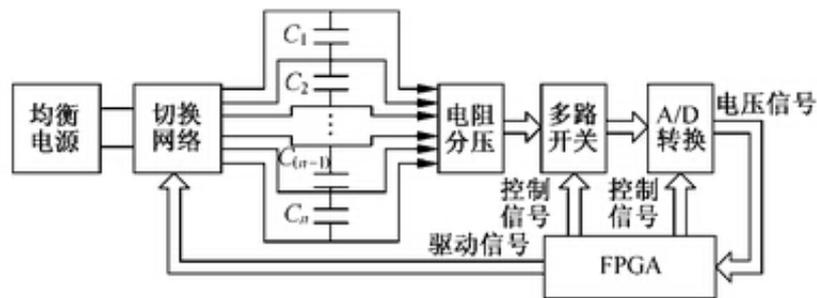


图 6 巡检监控系统总体框图

Fig.6 Framework of monitoring system

采用VHDL语言对基于FPGA的控制器进行设计，软件的总体框图如图7所示。其中总控制单元负责控制协调其他单元的运行，采样单元和A/D转换单元控制对各单体的电压采样，最小值单元判断电压最低的单体，驱动单元控制切换网络动作。

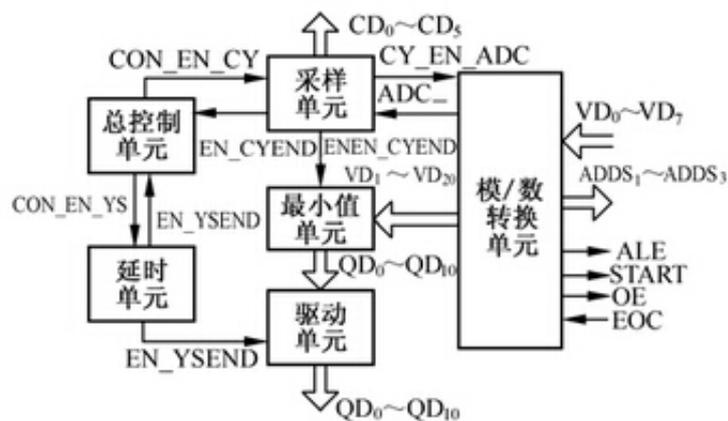


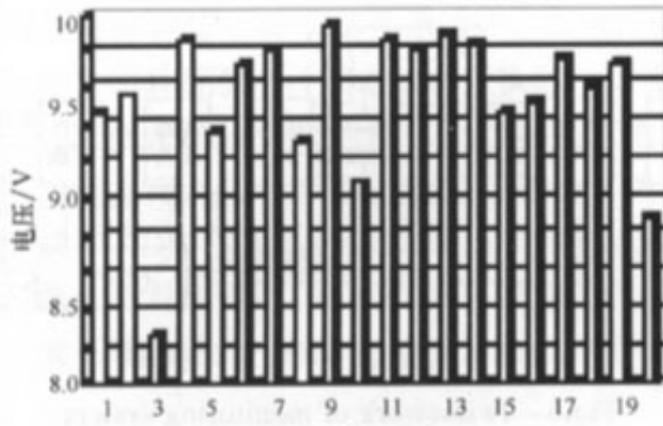
图 7 监控系统软件总体框图

Fig.7 Framework of software of monitoring system

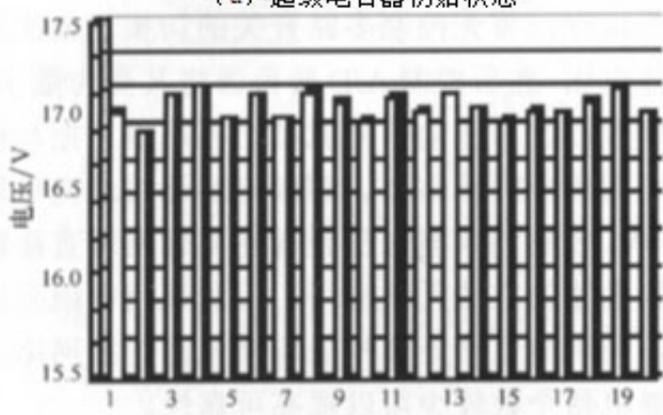
6实验结果

对20个单体串联的超级电容器组进行充、放电实验，实验结果如图8所示。其中，图8a所示为初始状态，各单体电压值比较分散，个别单体电压与期望电压9.5V差距较大；图8b所示为加入均衡系统后的充、放电结果，各单体电压值保持了较好的一致性。

实验中发现，均衡电源为单体补充充电的时间若保持固定不变，则动态均衡效果不是十分理想，因此可以考虑根据单体电压与整组平均电压的差值大小来调整均衡电源为其补充充电的时间。



(a) 超级电容器初始状态



(b) 加入均衡系统后的充放电情况

图8 单体电压分布图

Fig.8 Voltage distribution of cells

7结论

实验结果表明本文提出的均衡充电系统满足超级电容器组快速充电的要求，利用车载式均衡电源实现了电容器组各单体在充放电全过程中的能量均衡，有效地避免过充和过放。将缓冲式软开关电路应用于充电电源中，使开关管的工作条件得以改善，显著降低了大功率条件下的开关损耗。均衡电源采用带隔离变压器的半桥变换器，为高电压电容器组和低电压各单体建立了能量转移通道。以FPGA构成系统控制器，实时改变控制策略，有利于系统升级和功能扩展。采用相应的能量检测方法，该系统可推广应用于动力电池的能量均衡。

参考文献

- [1]Burke A . Ultracapacitors: why , how , and where is the technology[J] . Journal of Power Sources , 2000 , 91: 37-50.
- [2]王嘉善 , 王海杰 . 超级电容器电动车——城市公共 交通现代化新模式[J] . 城市车辆 , 2002 (1): 58-60 .
- [3]Linzen D , Buller S , Karden E , et al . Analysis and evaluation of charge balancing circuits on performance , reliability and lifetime of supercapacitor systems[C] . IEEE Industry Applications Society , 2003 , 3: 1589-1595.
- [4]Li H L , Zhang C N , Peng L Y , et al . Energy transferring dynamic equalization for battery packs[J] . Journal of Beijing Institute of Technology , 2005 , 14 (3): 306-309 .
- [5]Lee Y S , Chen G T . ZCS bi-directional DC-to-DC converter application in battery equalization for electric vehicles[C] . IEEE Power Electronics Specialists Conference , Aachen , Germany , 2004: 2766-2772.
- [6]Krein P T , West S , Papenfuss C . Equalization requirements for series VRLA batteries[C] . 16th Annual Battery Conference on Applications and Advances , 2001: 125-130.
- [7]Hung S T , Hopkins D C , Mosling C R . Extension of battery life via charge equalization control[J] . IEEE Transactions on Industrial Electronics , 1993 , 40 (1): 96-104.
- [8]Moo C S , Hsieh I S , Tsai I S , et al . Dynamic charge equalization for series-connected batteries[J] . IEEE Proceedings: Electric Power Applications , 2003 , 150(5): 501-505 .
- [9]Kutkut N H , Wiegman H L N , Divan D M . Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 1999 , 35 (1): 28-35.
- [10] Tang M , Stuart T . Selective buck-boost equalizer for series battery packs[J] . IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems , 2000 , 36 (1): 201-211.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/94888.html>