

串联超级电容器组的均压控制分析与研究^{*}

戴志兰 叶玉凤 秦晓飞

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 超级电容器作为一种高功率型储能装置,在生活中得到越来越广泛的应用,但是由于电容器单体电压较低,实际储能系统使用中必须通过串并联的方法构成超级电容器组。针对在应用过程中超级电容器串联存在的电压不平衡问题,文章提出了一种改进后的电容器均压控制电路。该电路由电容器、开关管以及变压器构成,通过反馈控制,简化参数计算,提高电压的一致性。最后在 MATLAB/Simulink 平台仿真验证了该控制电路下电压均衡速度快、误差小、且易于扩展,在电容器储能系统的使用中具有较高的应用价值。

关键词: 超级电容器;电压均衡;储能系统

中图分类号: TM53 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 470

Analysis and research about voltage equalization control of series supercapacitor

Dai Zhilan Ye Yufeng Qin Xiaofei

(USST of Photoelectric Information and Computer Engineering Institute, Shanghai 200093, China)

Abstract: As a kind of high power type energy storage device, super capacitor has been widely used in life. However, due to the low voltage of the capacitor, the super capacitor bank must be formed by series-parallel connection in the actual energy storage system. Aiming at the problem of voltage unbalance in the series connection of supercapacitors, an improved capacitor voltage control circuit is proposed in this paper. The circuit consists of capacitors and switches and transformers, through the feedback control, simplified parameter calculation, improve the voltage uniformity. Finally, MATLAB/Simulink simulation results show that the voltage balance is fast, the error is small, and it is easy to expand under the control circuit. It has a high value in the application of capacitor energy storage system.

Keywords: supercapacitor; voltage equalization; energy storage system

0 引言

在新能源革命的背景下电网的重要性日益突出,微电网的研究获得了社会各方面的广泛关注。微电网是指由分布式电源、能量储存装置、负荷、监控和保护装置等汇集而成的小型发电系统,是一个能够实现自我控制和管理的自治系统^[1-2]。在对电能质量要求越来越高的情况下,能够改善电能质量,提高供电稳定性的储能装置受到研究人员的广泛重视。

超级电容器作为近年来新兴的一种储能装置不仅具有功率密度大、组装方式简单、充放电循环寿命长等诸多优点,而且可控性强,转换效率高,工作温度范围广、无污染等特性也备受学者们的青睐^[3-5]。

但是超级电容器单体的电压都较低,实际的应用场合中需要多个超级电容器串联使用来达到储能系统所需电压的目的^[6]。由于目前用做超级电容器电极的多孔炭气凝胶

材料的诸多不可控性,以及其内部工作机理的复杂性导致超级电容器的参数并不是完全一样的,这样一来在充放电过程中电容器就会存在电压的不平衡性,严重影响了电容器的工作寿命以及储能系统的稳定性^[7-8]。本文设计了一种串联电容器均压电路,基于电容器两端电压与给定电压的误差控制以及整个电路总电压的控制,从而简化了整个系统的计算量,进而控制整个均压电路达到均压目的。

1 超级电容器模型建立

1.1 超级电容器工作原理

超级电容器内部结构示意图如图1所示。超级电容器由两片多孔电极、隔膜和电解液组成,其工作原理为:1)充电:在电极两端外加一个电压,正电荷和电子分别进入正负电极的多孔材料,使得电极带电,在库仑力的作用下电解液中的正负离子分别进入负正电极的空洞中,形成双电层,此时能量以双电层的形式被存储;2)放电:在外接放电电路

后,电极材料上的正负电荷流出电极,电极对电解液离子的库伦作用力减小,电解液离子从电极的孔洞中扩散回电解液,双电层消失^[9-10]。

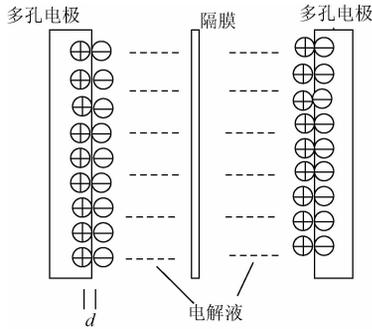


图1 超级电容器内部结构

由于电容器电极材料采用的是多孔炭气凝胶,其表面积可高达 $3\ 500\ \text{m}^2/\text{g}$,且双电层厚度在 $0.5\ \text{nm}$ 以下,由电容器电容的计算公式 $C = \epsilon_0 \epsilon A/d$ 可知,超级电容器的电容量要远远大于普通电容器。

式中: C 是电容值; ϵ_0 和 ϵ 分别是真空介电常数和相对介电常数; A 是双电层电极的面积; d 是双电层厚度。

1.2 模型建立

超级电容器的电极材料在3电极测试体系下的恒流充放电曲线如图2所示。可以很明显的看到在恒电流充放电最开始的极短时间内,端电压都有一个小幅度的陡升或陡降的情况。所以在实际的建模应用中必须要考虑不同电阻电容组合方式,来尽可能模拟实际中电容的工作情况。

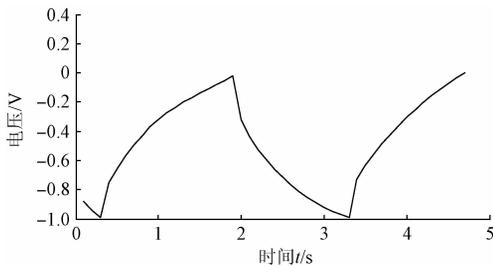


图2 超级电容器恒流充放电

尽管碳气凝胶的高比表面积是增大超级电容器比能量的有效途径,但是也正因为其高比表面积和大的孔隙率,以及分布不均的孔径大小导致了其内部工作机理的复杂性,所以超级电容的特性无法用独立的电容器去表达。本文选择最常用的改进的串联RC模型如图3所示,来建立超级电容的单体模型,以便进行后续均压电路的建模与仿真。

图3中 C 是理想电容,表示超级电容的容量; R_{ESR} 是等效串联电阻,它不仅表示超级电容器内部的发热损耗,而且在向负载放电时随着放电电流的大小变化其将引起不同的压降,同时对最大放电电流也有一定的约束作用; R_{EPR} 作为等效并联电阻,也称为漏电阻,模拟超级电容的漏电流效

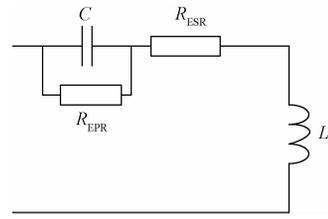


图3 超级电容等效模型

应,是影响超级电容器长期储能的重要参数; L 是等效串联电感。当超级电容器通过功率变换器与网络连接时处于较快的循环充放电过程中时, R_{EPR} 的影响可以忽略。

充放电时,超级电容端电压与理想电容电压为:

$$U = U_c \pm IR \quad (1)$$

$$U_c = U_0 \pm \frac{1}{C} \int_0^t (I - I_L) dt \quad (2)$$

式中: I 是放电电流; I_L 是漏电流; t 是充电时间; U_0 是放电开始前电容两端的电压。

荷电状态 SOC_c 表示超级电容器正常工作时储存电能的量。计算公式如下:

$$\text{SOC}_c = \frac{Q}{Q_c} = \frac{(U_c - U_{\min})C}{(U_{\max} - U_{\min})C} = \frac{U_c - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (3)$$

式中: U_{\max} 、 U_{\min} 分别代表最高、最低工作电压; Q 代表超级电容器可用剩余电量; Q_c 代表超级电容器额定容量。

2 电压均衡控制电路

2.1 均压电路拓扑结构

本文提出的电压均衡电路拓扑图如图4所示。均衡电路只画出了2个电容器单体并联的拓扑图,中间连接电子开关管、继电器和变压器等构成。

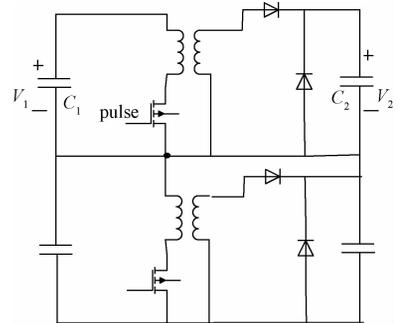


图4 均压电路拓扑结构

在单个电容器未连成电容器组均压前所储存的能量为:

$$E_0 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 + \frac{1}{2} C_2 V_2^2 \quad (4)$$

均压后并联系统的单体电压为:

$$U_1 = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

均压后其储存的能量为:

$$E_1 = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)U_1^2 = \frac{1}{2}(C_1 + C_2)\left(\frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2}\right)^2 \quad (6)$$

从式(4)、(6)可以算出均压前后损失的能量为:

$$E_{\text{loss}} = E_0 - E_1 = \frac{C_1C_2(V_1 - V_2)^2}{2(C_1 + C_2)} \quad (7)$$

两个超级电容器单体在均压时的一个周期里电压差为:

$$V_1 - V_2 = I_{\text{on}}\left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2}\right) = \frac{I}{f}\left(\frac{C_2 - C_1}{C_1C_2}\right) \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)可以看出:

$$E_{\text{loss}} = \frac{(C_2 - C_1)^2}{2C_1C_2(C_1 + C_2)} \frac{I^2}{f^2} \quad (9)$$

通过式(9)可以分析出均压的过程中能量的损失和流过电容器的电流的平方成正比,与开关频率的平方成反比。由此分析,在设计均压电路时在尽可能的选择容量大小相同的电容器单体的同时,尽量降低开关管的频率,减小充电电流,以降低电压均衡过程中的能量损失。

2.2 控制策略

电容器均压电路的控制电路分为单体均压控制和总体电流源控制两个部分。均压电路的控制框图如图 5 所示,单体的均压控制电路中 U_c 是电容器两端的实际电压,它和需要达到的给定电压值形成误差信号作为继电器的输入,通过设置二者误差信号的值来控制继电器的开关以及整个分支电路的运行情况,同时继电器的输出和串联电容器组总体的电压作为输入来控制脉冲的产生,进而控制整个电路达到均压的效果。

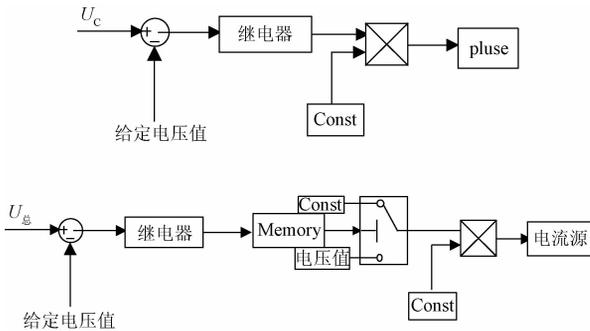


图 5 均压电路控制框图

电流源控制部分是从整个均压电路出发,整个均压电路的实际总电压和给定总电压形成的误差信号作为下一个模块继电器的输入,通过设置二者误差信号的值来控制继电器的开关以及整体电路的运行情况,其输出通过开关器件和右侧电压值共同作为电流源控制的输入,进而通过电路整体的电压反馈来控制电流源对电容器充电的控制。

3 仿真及结果分析

根据分析在 MATLAB/Simulink 仿真平台中按照图 4

的拓扑图搭建出由局部和整体共同控制的均压电路的仿真模型。主电路采用 6 个串联的超级电容器,各个支路的继电器模块检测实时电压与给定的电压值的误差大小进而控制整个均压电路的工作情况。仿真模型中各个参数分别为: C_1 电容为 2 F,初始电压为 3 V、 C_2 电容为 2 F,初始电压为 3.5 V、 C_3 电容为 2 F,初始电压为 0 V、 C_4 电容为 1.8 F,初始电压为 0 V、 C_5 电容为 1.8 F,初始电压为 3.5 V、 C_6 电容为 1.8 F,初始电压为 2 V;脉冲发生器频率为 5 kHz,用大小为 50 A 的恒流源进行充电仿真,结果如图 6 所示。

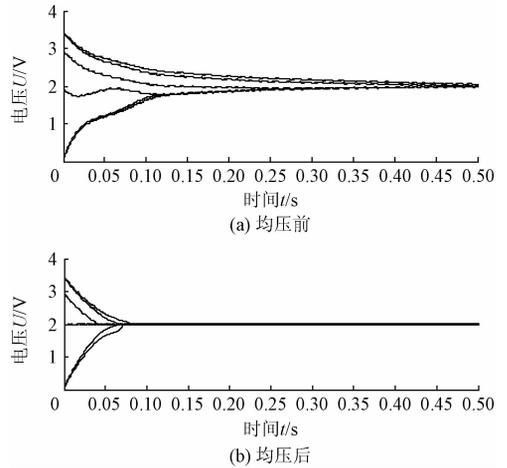


图 6 均压前后电容器电压变化曲线

从图 6(a)、(b)的对比可看出未启动电压均衡电路的控制策略给超级电容器充电时,各个超级电容器的电压有较大的差异,很难达到一致性。启动均压控制策略后 C_1 、 C_2 、 C_5 的电压迅速下降, C_6 的电压基本不变,而 C_3 、 C_4 电压则是迅速上升,经过大约 0.75 s 的时间 6 个电容器单体的电压达到一致。

为了进一步分析验证均压电路的有效性,把达到设定电压的波形进行放大,以便分析均压电路的误差,放大后的波形如图 7 所示。

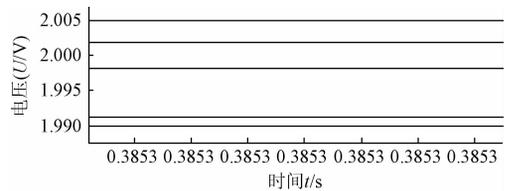


图 7 放大电压波形

电容器实际电压与设定值之间的最大误差为 $(2 - 1.99)/2 = 0.2\%$,从结果可以看出均压后的电路中各个电容器电压在很短时间内达到预定值,且误差只有 0.2%。仿真结果表明,本文所提出的均压电路与控制策略,不仅均压速度快,而且误差小,能达到一定的工业要求,使整个系

统的性能能够得到很大的提高。

4 结 论

针对超级电容器的使用过程中电压不均衡的问题,本文介绍了一种由电容器串联阵列以及开关管和继电器组成的新的超级电容器串联均压电路及其控制策略。分析了其具体的工作原理和控制方法,最后在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了均压电路的仿真模型,与其他模型相比该电路结构简单、控制方便,即通过控制输入继电器的误差进而控制开关管的脉冲,就能达到均压的目的。仿真结果验证了均压电路具有均压速度快、误差小等优点,能够更加有效的使用超级电容器。

参考文献

- [1] 杨洋,谭久俞. 含超级电容器的混合储能技术在微电网中的应用[J]. 电气开关, 2016, 15(3): 97-99.
- [2] 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): 330-333.
- [3] WANG Y H, WANG C, CHENG W Y, et al. Dispersing WO_3 in carbon aerogel makes an outstanding supercapacitor electrode material [J]. Carbon, 2014, 69: 287-293.
- [4] LEE Y J, PARK H W, HONG U G, et al. Mn-doped activated carbon aerogel as electrode material for pseudo-capacitive supercapacitor [J]. Current Appl Phys, 2012, 12(4): 1074-1080.
- [5] 张国军,孙小龙,李娅飞. 超级电容器均压方法研究[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(4): 64-66.
- [6] 杨晶晶,田永峰,张晓,等. 一种超级电容器组均压电路研究[J]. 电源技术与应用, 2013, 39(12): 68-72.
- [7] 王恩峰,龚学余,阳璞琼. 一种串联超级电容器组的均压电路设计[J]. 电子器件, 2015, 38(5): 1049-1051.
- [8] 孙谊,张晓冬. 基于复阻抗测量的碳基超级电容器建模研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(11): 977-981.
- [9] 刘小宝,许爱国,谢少军. 串联电容器组电压均衡研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(3): 48-51.
- [10] 张煌辉,张钟华,邵海明,等. 压缩气体高压电容器电压系数测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 530-536.
- [11] 王鑫,郭佳欢. 超级电容器在微电网中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(6): 19-21.
- [12] 李桂丹,彭亮,李华. 串联超级电容器组的能效均衡优化控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(12): 76-79.
- [13] 许爱国,谢少军,刘小宝. 串联电容器动态电压均衡技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 111-116.
- [14] 张莉,张宁. 串联超级电容器组电压均衡系统的设计[J]. 电子测量技术, 2011, 34(9): 8-10.
- [15] 裴莹,王友仁. 电池组均衡技术研究现状[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 21-24.

作者简介

戴志兰, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要从事电力电子与电力传动方向研究。

E-mail: tzxhdzl@163.com

秦晓飞(通讯作者), 1982 年出生, 工学博士, 高级工程师。主要研究方向为电力电子技术、运动控制技术、机器视觉技术等。

E-mail: xiaofei.qin@foxmail.com