

# 寄生电感在超级电容均衡系统中影响的研究

## A Study on the Influence of Parasitic Inductance in Supercapacitor Equalization System

赵卫, 李磊, 柳成, 王伟

Zhao Wei, LiLei, Liu Cheng, Wu Wei

南京理工大学 自动化学院, (南京, 210094)

Department of Automation, NUST (Nanjing, 210094)

**摘要:** 针对轨道交通再生制动能量回馈吸收利用系统的超级电容器储能系统, 设计了基于 DC/DC 变换器的馈能型均衡电路。由于系统工作在高频状态, 以及超级电容拥有的特殊性: 较大的容值和一个很小的漏感, 在工作时就会产生一个明显的谐振, 谐振的存在会严重影响系统的稳定性和可靠性。本文具体分析了整个系统中谐振的产生机理, 建立模型, 对工作中产生的谐波大小进行分析, 最后进行了实验, 验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 超级电容 寄生电感 谐振

**Abstract:** For rail transit regenerative braking energy feedback absorption utilization system of super capacitor energy storage system, we designed a feed- based energy- balancing circuit DC / DC converter. Since the system operates in high frequencies and super capacitor has its own particularity: the larger capacitance and a small leakage inductance. These will have a significant resonance at work. Resonant presence will seriously affect the stability and reliability of the system. This article detailed analysis of the mechanism of resonance of the entire system, modeled on the size of the work generated harmonics are analyzed, and finally carried out experiments to verify the theoretical analysis.

**Keywords:** Super capacitor, Parasitic inductance, Resonance

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2014) 12-0027-04

## 1 引言

超级电容器 (Super-capacitor、Ultra-capacitors) 也被称作双电层电容器 (Double-layer capacitor), 利用电极和电解液之间形成的界面双电层电容来存储电能<sup>[1]</sup>。作为新兴的能量储存器件, 超级电容器兼具蓄电池能量密度大和普通电解电容器功率密度大的优点。在轨道交通再生制动能量回馈吸收利用系统中, 超级电容器组成的阵列可作为再生制动能量的储存系统, 当需要时再将吸收储存的能量释放出来。

超级电容器的电容量很大, 可以达到数 1000F, 但是其额定电压很低, 一般只有 1V~3 V, 过压工作将会引起超级电容器内部的电解质分解, 从而使电容器损坏<sup>[2]</sup>。因此, 必须通过超级电容器串并联组合构成超级电容器阵列, 才能满足实际应用系统对电压和能量等级的需要。同一型号规格的超级电

容器, 在电压、内阻、容量等参数上存在着不一致性, 这主要是由制造过程中工艺的误差和材料的不均匀造成的, 而在超级电容器使用过程中, 工作环境不同以及电压不均衡的积累, 又加剧了超级电容器参数的一致性<sup>[3]</sup>。因此, 在实际应用中, 串联超级电容器必须采取电压均衡措施。

在超级电容器出现之前, 串联电池组的电压均衡问题已经成为国内外学者研究的热点, 提出了各种电压均衡的方案<sup>[4]</sup>。其中能量转移型, 主要有“飞度电容”法、传统多绕组变压器法、DC-DC 变换器法, 这类方法能量转换效率高、均衡速度快, 但由于加入大量电子元器件, 增加了电路复杂性, 也使系统在控制上产生了一定难度<sup>[7]</sup>。尤其是在超级电容均衡时, 电路通常工作在高频条件下, 超级电容由于本身的容值很大, 会与寄生电阻、寄生电感、线路的感值等, 产生一系列的问题。

这些，前人都是没有专门研究过的。

本文针对超级电容储能系统，研究了超级电容的模型建立，并根据超级电容均衡控制电路的特点建立模型，研究了均衡中在高频环境下的超级电容的振荡波形，并根据模型、进行实验，验证了模型和分析的正确性。

## 2 模型的建立及分析

### 2.1 超级电容器等效模型的建立

目前，实际应用最多的超级电容器模型，是物理模型和等效模型。其中最为典型的超级电容器模型是多阶梯等效模型和集中等效模型，分别如图 1 (a) 和 (b) 所示。

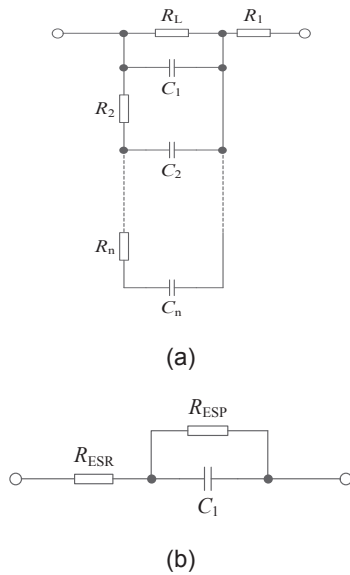


图 1 超级电容器等效模型：(a) 多阶梯等效模型；(b) 集中等效模型

多阶梯等效模型为了尽量近似逼近超级电容器的外特性，其构成都考虑了超级电容器的分布参数影响，并且其参数具有明确的物理意义。按照实用简便的原则，通常采用集中等效模型描述超级电容器的电气特性。

集中等效模型物理意义的解释： $R_{ESR}$  为超级电容器的等效串联电阻； $R_{ESP}$  为超级电容器的等效并联电阻，实际意义为超级电容器内部的漏电流，由于超级电容器的漏电流很小， $R_{ESP}$  也可以忽略不计； $C_1$  为超级电容器的容值。

最近的研究，根据超级电容器的动态响应特性，提出一些新的超级电容器等效模型，如 R. Faranda 等提出的“双分支结构等效模型” (two branches model)<sup>[4]</sup>；Ran Niu 等提出的超级电容器黑盒等效模型。这些新型的等效模型依然存在待研究的问题，未能够进入工程实用阶段。

### 2.2 适用于均衡电路的超级电容器模型建立

在实际应用中，由于超级电容器使用时，是大量的超级电容器串并联使用的，所以，对应的超级电容器模块的模型，

则更加的复杂，不仅需要考虑寄生电阻，同时对于整个模块，在高频均衡时，需要考虑寄生电感的影响。在低频工作，电容容值比较小时，超级电容器寄生电感，串并联之间线路及工作线路上寄生的电感，对超级电容器电压的影响不是很明显。但是，在超级电容器工作在均衡控制时，寄生的电感会与超级电容器一起产生很大的谐振。会影响超级电容器的正常工作，甚至会影响超级电容器的使用寿命。

因此，考虑寄生电感，在超级电容器的集中等效模型的基础上进行建模与分析。

如图 2 所示，超级电容器的模型，在集中等效模型的基础上串联一个寄生电感  $L_{ESL}$ ，寄生电感的感值由超级电容器本身电感的感值、加上线路的感值组成。

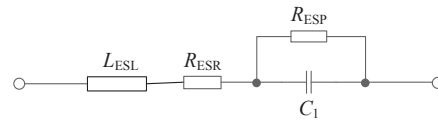


图 2 考虑寄生电感的等效模型

由于实际意义超级电容器的漏电流很小， $R_{ESP}$  也可以忽略不计，因此，线路等效工作时，如图 3 所示

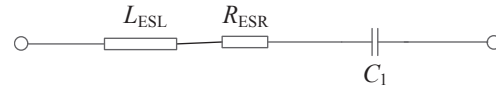
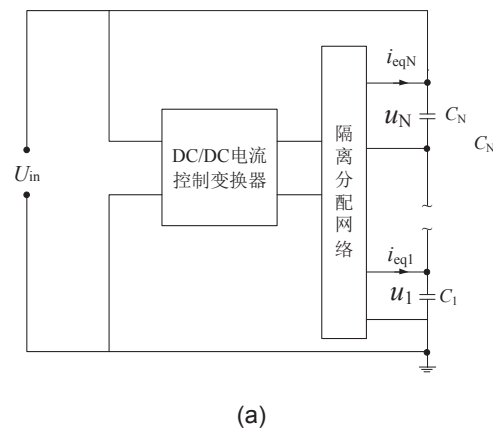


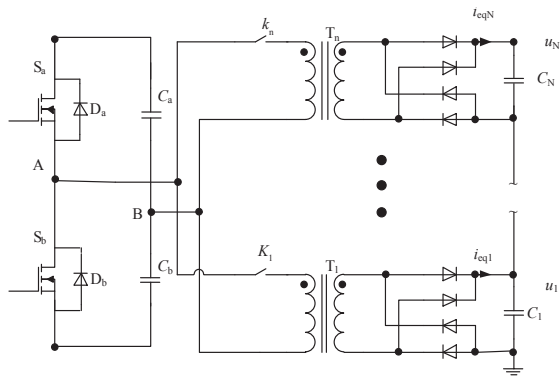
图 3 均衡电路超级电容等效模型

### 2.3 模型在均衡时的工作原理

在 DC/DC 型馈能均衡电路中，变压器的使用是不可避免的。如图 4 所示，是一种超级电容器的总体工作框图，均衡控制电路将超级电容器整体两端作为输入，DC/DC 变换电路控制均衡时电流大小。作为输出的是单体电容的每一个模块，需要对输入和输出进行隔离。又因为超级电容器组一般为数组串联使用，对于单体超级电容器，输入电压为单体的  $N$  倍。要想输入输出隔离以及获得较好的 DC/DC 电路的占空比，使用变压器进行隔离和降压是最好的选择。因此，如图 4 (b) 所示，为带变压器的隔离分配网络。



(a)



(b)

图4 均衡电路的总体工作框图

在工作时，半桥工作在高频状态。变压器由于存在漏感，电流不会突变，设均衡电路工作在 50kHz，图 5 给出了电路各模态的工作波形。

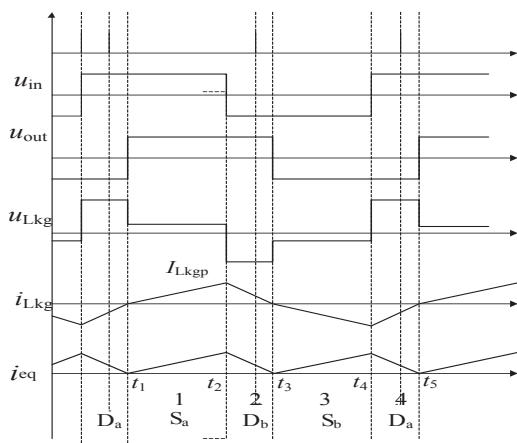


图5 各模态的工作波形

变压器原边漏感的作用，电流下降沿电流纹波为  $\gamma$ ，均衡时控电流为  $I_{eq}$ ，则有：

$$\begin{cases} 2u_{in} = L_{kg} \times \frac{di}{dt} \\ K = \frac{di}{dt} \\ t_{off} = I_{MAX} / K \\ \Delta I = 2I_{eq} \times \gamma \\ I_{MAX} = I_{eq} + \Delta I \end{cases} \quad (1)$$

可以求得：

$$t_{off} = (I_{eq} + I_{eq} \times \gamma) \times \frac{L_{kg}}{2u_{in}} \quad (2)$$

可知，工作过程中存在高频震荡，超级电容器两端的电

流工作在一个高频纹波的状态。在电流纹波的下降沿，电流变化迅速，由于电流的变化率很大，超级电容器的串联电感上产生一个大的电压尖峰，并由此产生振荡，影响电路稳定。

$$\Delta u_{out} = L_{les} \times \frac{di_{cap}}{dt} = L_{les} \times \frac{I_{cap_{max}}}{t_{off}} = \frac{L_{les} \times I_{MAX} \times N_1}{t_{off} \times N_2} \quad (3)$$

式(3)带入式(2)得：

$$\Delta u_{out} = L_{les} \times \frac{di_{cap}}{dt} = L_{les} \times \frac{I_{cap_{max}}}{t_{off}} = \frac{2u_{in} \times L_{les} \times N_2}{L_{kg} \times N_1} \quad (4)$$

$$L_{les} = L_{cap} + L_i$$

其中： $L_{CAP}$  为超级电容器漏感， $L_i$  是变压器副边漏感。由式(4)可知，超级电容器输出电压的尖峰大小与变压器原边漏感、超级电容器寄生电感、变压器变比和输入电压有关。

产生的电压尖峰，在电压经由二极管续流，构成续流回路，产生谐振，从而组成一个 RLC 谐振电路。谐振频率如式(5)所示。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CAP}C_1}} \quad (5)$$

由于超级电容器的容值很大，因此，当串联的感值很小的时候，就会产生一个很大的谐振，并且随着频率的增加，谐振的幅值也随之而增大。

### 3 实验

#### 3.1 电路参数设计

实验平台选用 12 组超级电容模块串联，容值均为 222F，额定电压为 48V，等效  $R_{ESR}=3m\Omega$ ，原边漏感感值  $1\mu H$ ，副边漏感为  $0.2\mu H$ ，变压器变比  $N_1:N_2=4$ ，原边的输入电压采用死区为  $1\mu s$  的频率为 50kHz 的半桥输入，对应均衡电路进行实验分析。

#### 3.2 实验结果分析

电路的实验结果如图 6 所示。

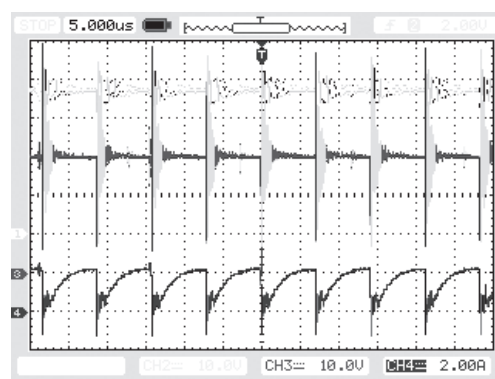


图6 实验结果图

由图 6 可以看到，在均衡时，超级电容器的输入电流为

1.5A，超级电容器的模块两端由于谐振产生了高频谐振，且谐振的幅值很大。超级电容器电压为 25V，谐振的幅值能达到 32V，由式（4）求得串联的感值为  $0.208\mu\text{H}$ ，与实际值相符。由于有电容的  $R_{\text{ESR}}$  存在，超级电容器的整体谐振会随着时间而减小。

进一步实验，放大谐振波形，采样超级电容器两端的电压，得到的超级电容器的谐振波形，见图 7。

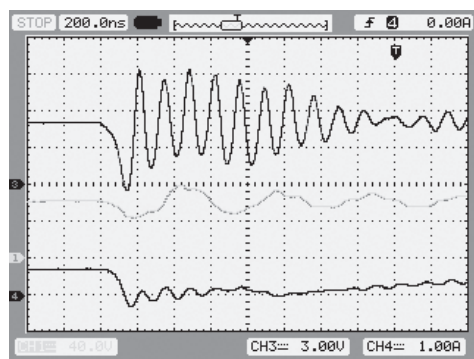


图 7 谐振波形图

可知，谐振的周期为 350ns。由式（5）可以求得  $L_{\text{CAP}}=1.3 \times 10^{-5}\text{nH}$ 。可知，在超级电容器的寄生电感值非常小，串联电感主要由于变压器副边的寄生电感提供，所以，传统的串联电感以减小电流纹波的做法，只会使得电路产生更大的震荡，增加电压纹波。

由以上实验结果可以验证，实验波形与理论分析的完全符合。

## 4 结论

本文研究和分析了超级电容的模型、及其寄生参数，根据均衡控制电路的特点，对模型进行分析，研究了工作时超级电容的谐振因素，以及谐振产生的原因及机理。根据理论分析，进行了实验验证，实验结果与理论相符合，为进一步优化均衡控制系统奠定了基础。

（上接第 26 页）

和线缆的损耗）。如果配置了 UPS，而 UPS 输出容量利用率可高达 60%，此时 UPS 效率可达 90%，但同时谐波造成的传输损耗加大 0.02，结果整个系统的 PLF 值增加到 0.17；

“等级 II”的数据中心与“等级 I”的主要区别，是基础设施系统中的关键设备采用了部件冗余配置 ( $N+1$ )。供电系统的关键设备是指 UPS，此时 UPS 输出容量利用率降到 30%，UPS 效率降低到  $\leq 85\%$ ，再加上谐波造成的传输损耗加大 0.02，则 PLF 值增加到 0.22；

“等级 III”是同时可维修系统，“等级 IV”是故障容错

## 参考文献

- [1] 李友瑜，杨守焕，阳吉初，等. 地铁列车制动电阻的种类及优化设计 [J]. 城市轨道交通研究, No. 05, 2010: 49-53.
- [2] 李奇睿. 基于超级电容器的统一电能质量调节器的研发. [硕士学位论文], 华北电力大学(北京), 2005.
- [3] 李海东. 超级电容模块化技术的研究, [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [4] 薛小军. 基于超级电容的车辆制动能量回收系统的仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [5] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用 [J]. 电气应用, No. 04, 2005: 1-2+4-6+8-19.
- [6] 冯晶晶. 基于超级电容的再生制动能量吸收利用技术研究. [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2010.
- [7] 刘均. 动力电池管理系统设计与实现 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [8] 张娜. 电化学超级电容器电极材料的研究. [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2003.
- [9] C. Arbizzani, M. Mastragostino, F. Soavi. New trends in electrochemical supercapacitors. Journal of Power Sources, Vol. 100, No. 1-2, 2001.

## 作者简介

赵卫 (1990 ~)，男，汉，江苏泰州人，硕士研究生，研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

李磊 (1975 ~)，男，汉，山东济宁人，博士，副教授，研究方向为功率电子变换技术。

柳成 (1988 ~)，男，汉，江苏泰州人，硕士研究生，研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

武伟 (1984 ~)，男，汉，安徽人，博士研究生，研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

系统。以“等级 IV”为例，供电系统肯定是  $2N$  (双总线系统)，UPS 以及其它所有供电设备的容量利用率都再次降低，与“等级 II”相比，PLF 值会增加到  $\geq 0.25$ 。

## 作者简介

张广明，中国科学院计算技术研究所研究员，中国电源学会专家委员会主席，长期从事数据中心供电系统和供电设备的研究，曾出版有关数据中心供电系统内容的专著 4 本以及多篇论文。