

车用超级电容的建模与仿真

金朝勇¹, 张炳力², 徐小东¹, 徐德胜², 谈健²

(1.安徽交通职业技术学院, 安徽合肥230001; 2.合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽合肥230009)

摘要: 超级电容是近年发展起来的一种新型储能单元, 广泛应用于汽车行业。在分析超级电容结构的基础上, 根据超级电容的本身特性并结合超级电容试验数据建立了超级电容的数学模型, 最后根据数学模型建立了超级电容的Matlab / simulink模型, 并对其进行了仿真研究。

引言

超级电容 [1, 2]

在汽车行业有着广泛的应用, 不仅适合用作汽车发动机启动、动力转向等子系统的辅助能源, 而且还可以与电池、燃料电池等结合用作电动汽车的辅助能源, 从而达到提高电池寿命、弥补燃料电池比功率不足、最大限度地回收制动能量等效果。随着超级电容技术的迅速发展, 其在汽车领域的应用前景十分广阔。在介绍超级电容的结构, 并在研究超级电容充放电、内阻等特性的基础上, 结合试验数据建立了超级电容的数学模型。根据超级电容的数学模型建立了超级电容的Matlab / simulink模型, 并进行了仿真, 对仿真结果进行分析, 为超级电容以后在汽车中的应用提供参考。

1 超级电容的结构

常用的碳电极的双电层电容器结构 [3]

如图1所示, 双电层超级电容是悬在电解质中的两个非活性多孔板, 电压加载到两个板上。加在正极板上的电势吸引电解质中的负离子, 负极板吸引正离子, 从而在两电极的表面形成了一个双电层电容器。双电层电容的大小与电极电位和比表面积的大小有关, 常常使用高比表面积的活性炭作为双电层电容器的电极材料来增加电容量。

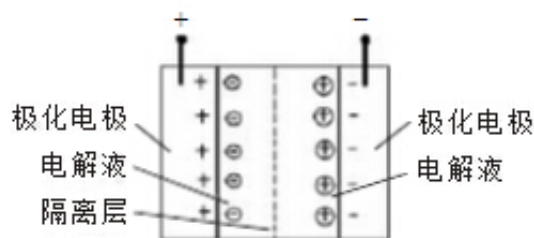


图 1 双电层超级电容器结构图

2 超级电容的建模

2.1 超级电容的等效电路

如图2所示, 超级电容可以等效为一个理想电容器C和较小阻值的电阻 R_{es} (等效串联阻抗) 串联, 同时与一个较大阻值的电阻 R_{ep} (等效并联阻抗) 并联。

通电状态下, 通过并联内阻 R_{ep} 的放电电流 I_s 称为漏电流, 它影响超级电容的长期储能性能, 并联内阻 R_{ep} 通常很大, 有几 $10k\Omega$ 。采用大电流充电时, 由于超级电容串联等效电阻 R_{es} 的存在, 会使超级电容的充电效率一定程度的降低, 因此需要考虑充电电流对超级电容的工作效率的影响, R_{es} 通常很小, 一般只有几 $10k\Omega$ 。

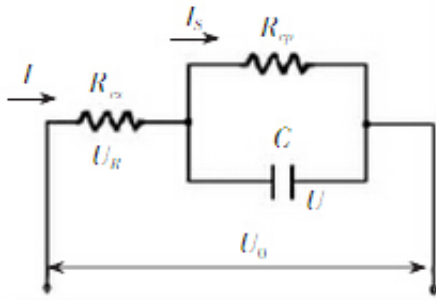


图 2 超级电容等效电路图

令充电时的功率 P 和电流 I 为负值, 放电时的功率 P 和电流 I 为正值。则超级电容端电压 U_0 :

$$U_0 = U - I \cdot R_{eq} \quad (1)$$

$$P = U_0 \cdot I = (U - I \cdot R_{eq}) \cdot I \quad (2)$$

其中 U_0 ——超级电容端电压; U ——电容器电压;
 U_{eq} ——等效串联内阻 R_{eq} 上电压; I ——充放电电流。

(1) 超级电容量 C 和实际储存电量 Q

超级电容量 C 与工作电流和工作温度有关, 即 $C = f(T, I)$ (3)

具体函数可以通过实验测得, 根据超级电容量定义计算: $C = \frac{dQ}{dU}$ (4)

设第 n 时刻超级电容储存的电量为 $Q(n)$, 则第 $n+1$ 时刻超级电容储存的电量为

$$Q(n+1) = Q(n) - I \Delta t \quad (5)$$

(2) 超级电容工作电压 U , 荷电状态 SOC 和超级电容输出能量 E

设某时刻超级电容的工作电压为 $V(n)$, 下一时刻为 $V(n+1)$, 则有

$$V(n+1) = V(n) - \Delta U = V(n) - I \frac{\Delta t}{C} \quad (6)$$

超级电容在工作状态中应考虑工作寿命, 故应使其工作在合理的电压范围内 $[V_{min}, V_{max}]$, SOC 能反应超级电容储存电量的多少, 即充放电的程度, 其定义如下: $SOC = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}$ (7)

$$E = \frac{1}{2} C U_{max}^2 - \frac{1}{2} C U_{min}^2 \quad (8)$$

(3) 超级电容的等效内阻 R_0 和效率 η

超级电容的等效内阻 R_0 指的是超级电容的等效串联阻抗。它和工作电流和工作温度有关, 即

$$R_0 = f(T, I) \quad (9)$$

具体函数可以通过交流恒流充电法测得:

$$R_0 = \frac{U'}{I'} \quad (10)$$

其中 U' ——交流充电时的压降, I' ——交流充电电流。

超级电容的效率 η 定义为充放电过程充电能量和放电能量之比, 即:

$$\eta = \frac{E_{dis}}{E_{cha}} = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (11)$$

其中 I_c ——放电电流; I_d ——充电电流。

充电效率 η_c 定义为超级电容储存能量与充入能量之比, 即:

$$\eta_c = \frac{\frac{1}{2} C (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (12)$$

其中 U_{max}, U_{min} 分别为超级电容充电时起始和截止电压。

放电效率 η_d 定义为超级电容输出能量与超级电容储存能量之比, 即:

$$\eta_d = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\frac{1}{2} C (U_{max}^2 - U_{min}^2)} \quad (13)$$

其中 U_{max}, U_{min} 分别为超级电容放电时起始和截止电压。

2.2 超级电容的数字模型^[4]

$$\text{超级电容量 } C; C = f(T, I) \quad (14)$$

超级电容储存电量 Q :

$$Q(n+1) = Q(n) - I \Delta t \quad (15)$$

超级电容充放电功率 P :

$$P = U_0 \cdot I = (U - I \cdot R_{eq}) \cdot I \quad (16)$$

超级电容工作电压 U :

$$V(n+1) = V(n) - I \frac{\Delta t}{C} \quad (17)$$

超级电容电池荷电状态 SOC :

$$SOC = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (18)$$

超级电容输出能量 E :

$$E = \frac{1}{2} C U_{max}^2 - \frac{1}{2} C U_{min}^2 \quad (19)$$

$$\text{超级电容等效内阻 } R_0; R_0 = f(T, I) \quad (20)$$

$$\text{超级电容效率 } \eta = \frac{E_{dis}}{E_{cha}} = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (21)$$

$$\text{充电效率 } \eta_c; \eta_c = \frac{\frac{1}{2} C (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{\int_0^t I_c \times u(t) dt} \quad (22)$$

$$\text{放电效率 } \eta_d; \eta_d = \frac{\int_0^t I_d \times u(t) dt}{\frac{1}{2} C (U_{max}^2 - U_{min}^2)} \quad (23)$$

3 超级电容的simulink模型与仿真

3.1 超级电容的simulink模型

根据上面的数学模型，以某超级电容实验数据建立超级电容的MATLAB / Simulink模型[5]，如图3所示。模型以充放电功率和温度为输入量，电压、电流、SOC值为输出量。对该模型进行等功率充放电仿真。

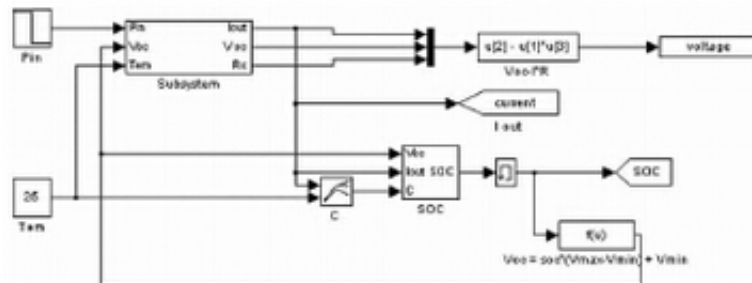


图 3 超级电容的 simulink 模型

3.2 超级电容simulink模型的仿真[6]

假定模型的工作温度恒定在25℃，电容工作电压上限为1.4V，下限为0.8V，电容初始SOC值为0.8，对模型输入一个循环等功率充放电，如图4所示。模型输出的电压值、SOC值和电流值变化曲线如图5、图6和图7所示。

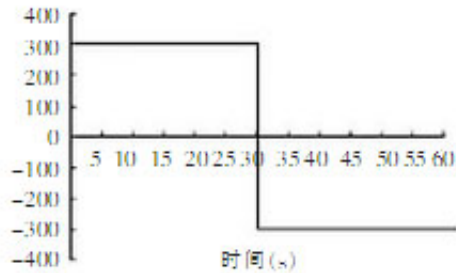


图4 循环等功率放电-充电曲线

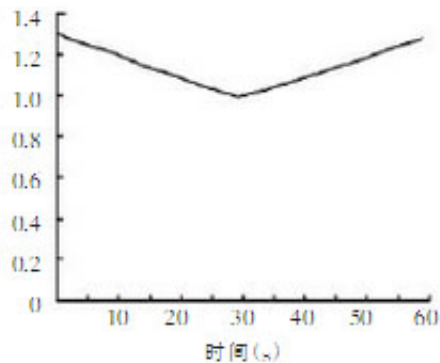


图5 电压变化曲线

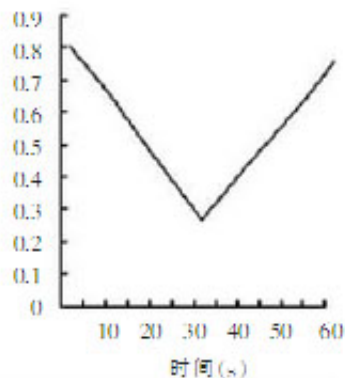


图6 SOC 值变化曲线

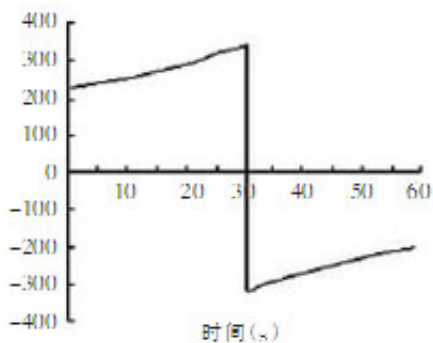


图7 电流变化曲线

图5为超级电容的电压变化曲线，超级电容电压随着放电由初始的1.28V降到了0.95V左右，随着充电的进行，电压逐渐回升，最后回到1.25附近，电压变化近似呈线性关系。由图6可以看出，超级电容的SOC值随着放电下降，随着充电上升，其近似于呈线性关系，SOC由初始的0.8降到0.25左右，由于超级电容的内阻存在损耗，SOC值最终回到0.76附近。图7为超级电容的电流变化曲线，随着放电的进行，SOC值逐渐下降电压降低，由于是等功率充放电，所以放电时电流逐渐上升。充电时情况刚好相反，充电时随着SOC值上升电压升高，电流逐渐减小，其具体变化如图7所示

，超级电容的电流变化近似呈线性关系。

4结论

超级电容是一种非常具有应用前景的新型能源，本文对超级电容的结构功能特性进行了研究，并通过模型的建立与仿真，验证了超级电容的充放电特性，为超级电容的应用提供了参考。

参考文献

- [1]张炳力，赵韩，张翔等.超级电容在混合动力电动汽车中的应用[J].汽车研究与开发，2003，（5）：48 - 50.
- [2]曹秉刚，曹建波，李军伟，续慧，许鹏.超级电容在电动车中的应用研究[J].西安交通大学学报，2008，（11）：7 - 12，
- [3]王鑫.超级电容器在汽车启动中的应用[J]，国外电子元器件，2006，（5）：57 - 59，
- [4]闫晓磊，钟志华，李志强，朱德康.HEV超级电容自适应模糊神经网络建模研究[J].湖南大学学报（自然科学版），2008，（4）：38 - 41.
- [5]强国斌，李忠学，陈杰.混合电动车用超级电容能量源建模[J].能源技术，2005，（2）：16 - 19.
- [6]李源，张豫南，颜南明，李瀚飞，王冬.超级电容起动动态过程分析与建模仿真[J].装甲兵工程学院学报，2006，（6）：70 - 72.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/94187.html>