

城轨应用中的超级电容器组 等效电路模型研究

胡斌, 杨中平, 林飞, 赵坤, 赵亚杰
(北京交通大学, 电气工程学院, 北京, 100044)



作者简介: 胡斌(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电传动

摘要: 文章针对城市轨道交通的实际工况, 从超级电容通用等效电路中简化出了可准确描述超级电容器组电压、电流、功率和储能等电气特性的带可变电容的一阶 RC 模型; 利用实验测定的方式对超级电容器组进行了参数识别, 仿真和实验结果验证了超级电容简化模型的精确性; 对超级电容器组简化等效电路模型进行了频域分析, 并结合城轨实际应用研究了超级电容器组的工作特性。

关键词: 城市轨道交通; 超级电容; 等效电路模型; 参数识别; 工作特性

中文分类号: TM531 文献标识码: A 文章编号:

Equivalent Circuit Model of Super Capacitor Group in Urban Rail Transit Application

Hu Bin Yang Zhongping Lin Fei Zhao Kun Zhao Yajie

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the urban rail transit actual working condition, a first order RC model with a variable capacitor was simplified out from the super capacitor general equivalent circuit, which can accurately describe super capacitor group electrical characteristics such as voltage, current, power and stored energy, etc; parameter identification was done for super capacitor group using experimental measurement, simulation and experimental results demonstrate the accuracy of super capacitor simplified model; the model was analyzed in frequency domain, and the working characteristic of the super capacitor group was discussed in urban rail transit application.

Keywords: urban rail transit; super capacitor; equivalent circuit model; parameter identification; working characteristic

0 引言

轨道交通是公共交通体系中的重要组成部分, 是解决城市交通拥堵的重要手段。城市轨道交通的运行特点是站间距短、车辆运行密度大、运行过程中启动和制动频繁^[1,2]。车辆在制动过程中, 电机工作在发电状态, 产生的电能返回电网, 称为再生制动; 若再生制动能量不能被临近牵引车辆有效吸收, 就会导致牵引网能量囤积、网压抬升, 进而导致再生失效现象的发生^[2,3]。与此同时, 随着人口的增加, 城市轨道交通高峰时段的发车时间间隔也在相应减小, 若同一区段内牵引车辆较多, 则将导致牵引网电压跌落, 影响车辆

牵引性能。

国内的城市轨道交通牵引供电制式分为 DC750V 和 DC1500V 两种, 其电压波动允许范围分别为 500-900V 和 1000V-1800V^[2], 如上所述, 过高或过低的接触网电压均会对城市轨道交通系统带来不利的影响。近年来, 为了防止再生失效的发生和抑制接触网电压过大波动, 超级电容储能系统在城市轨道交通领域得到了应用^[1-3]。庞巴迪公司和西门子公司的超级电容储能装置在西班牙马德里、德国波鸿、美国波特兰等地的城市轨道交通线路上均有应用^[3]; 2007 年, 北京地铁 5 号

线引进了 4 套四套西门子公司的 SITRAS SES SCESS，成为国内首例应用地面式超级电容储能装置的轨道交通运营公司 [2,3]。

在超级电容应用于城市轨道交通的过程中，需要对超级电容单体进行串并联构成大型超级电容模组，以达到电压、电流、功率和储能等方面的要求。文献[6,7]分别对超级电容单体和模组进行了建模方面的研究，得出了温度、充放电频率及电压对超级电容容量的影响规律。针对城市轨道交通的特定工况，超级电容器组的准确建模将影响到系统参数的合理设计及其储能特性的充分发挥。本文结合了城市轨道交通的特性及超级电容本身的特点得到了一种简化的超级电容器组等效电路模型，通过仿真和实验的方式验证了该等效电路模型的合理性，并结合超级电容器组实际工作频率对其工作特性进行了分析。

1 超级电容等效电路模型

超级电容单体主要由集流器、活性炭电极、电解液以及隔离层组成，如图1所示：

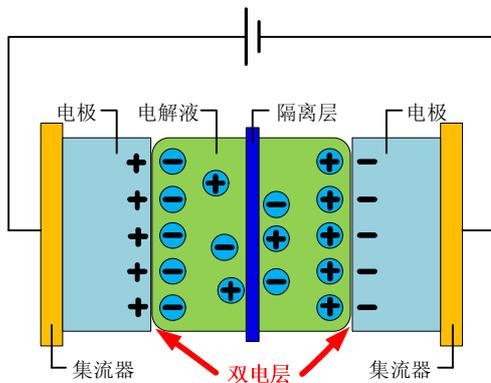


图1 超级电容结构示意图

这些因素是超级电容单体的主要内阻来源；在单体串并联使用过程中，单体间的连接电缆内阻和接触电阻构成单体间等效内阻，单体内阻和单体间内阻共同组成了整个超级电容器组的内阻，如图2所示：

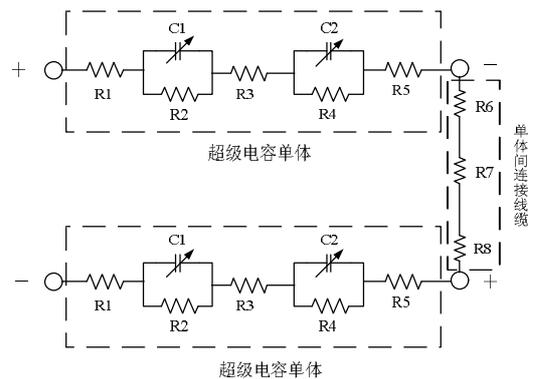


图2 超级电容器组等效内阻

上图中： R_1 、 R_5 为集流器电阻； R_2 、 R_4 为活性炭电极介质电阻； R_3 为电解液/隔离层电阻； C_1 、 C_2 为活性炭电极电容； R_6 、 R_8 为连接电缆接触电阻； R_7 为连接电缆内阻。

很多学者基于超级电容本身的物理结构、超级电容的应用功率场合以及超级电容循环充放电速度等方面提出了多种超级电容的等效模型，如一阶经典RC模型，RC传输线模型、多分支RC并联模型以及超级电容器的频域模型等[4,5]。近年来，还有学者基于神经网络和模糊控制原理提出了超级电容的ANN模型[5]，高精度地模拟超级电容的非线性特性。若将各种情况下的超级电容模型加以综合，便可得到图3所示的超级电容通用等效电路模型。

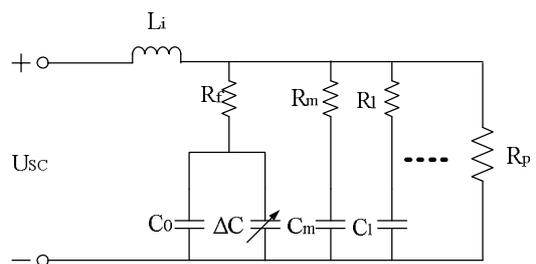


图3 通用超级电容等效电路模型

上图中：

U_{sc} 为超级电容端口电压；

L_i 为超级电容内部等效电感，应用于超级电容的高频模型，当超级电容充放电速度极快（即工作在高频段）且处于强脉冲充放电工况（如电磁发射、粒子加速器、高功率激光/微波等场合）时，其作用不可忽略；

R_f 、 C_0 、 ΔC 三者共同组成了超级电容充放电

的快速响应支路，对应着超级电容秒级充放电的工作状态，其中： R_f 为支路等效内阻， C_0 为电容初值（电容未投入工作且电压为0时的电容值）， ΔC 为可变电容，该支路的等效电容可表示为：

$$C_f = C_0 + \Delta C \quad (1)$$

R_m 、 C_m 、 R_l 、 C_l 分别构成了超级电容的中速响应支路和长时响应支路，这两个支路对应于超级电容的备用状态，通常有数分钟到小时级的时间常数：

R_p 为超级电容的等效并联电阻EPR（Equivalent Parallel Resistance），影响着超级电容漏电流的大小，是对超级电容在未投入工作的静置状态下长期储能特性的描述。

当超级电容储能装置在城市轨道交通应用中处于正常工作状态时，充放电的时间均为秒级，且超级电容器组在充放电瞬间能达到的功率等级在数百kW甚至MW级，所以，采用超级电容的快速响应支路即可较为准确的描述超级电容的工作状态。

根据超级电容大规模模组化、充放功率高、充放电频率快等特点对通用超级电容等效电路模型进行简化，得到超级电容器组的简化等效电路模型，如图4所示：

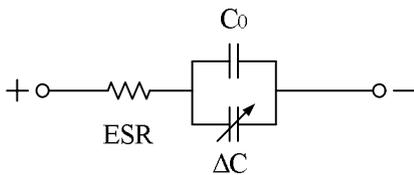


图4 超级电容器组简化等效电路模型

2 简化等效电路模型的实验验证

2.1 实验原理介绍

为了验证在城市轨道交通中超级电容器组简化等效电路模型的合理性，在实验室搭建了30kW的超级电容储能系统平台，用以模拟城市轨道交通应用中的超级电容器组工作状态，并对超级电容器组简化等效电路模型的精确性进行验证。

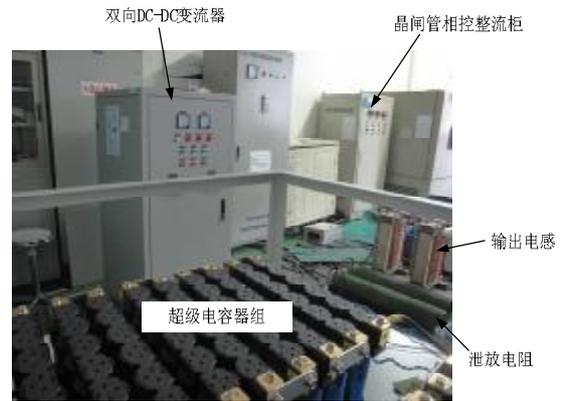


图5 超级电容储能系统外观图

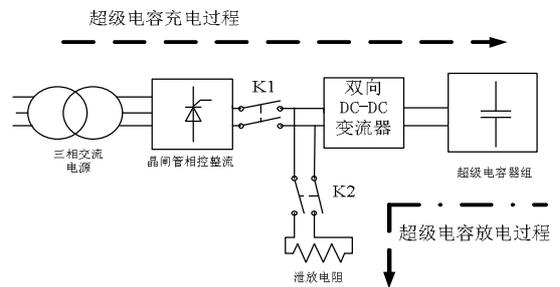


图6 超级电容器组充放电原理

双向DC-DC变流器采用富士电机的1200V/300A IGBT模块。

超级电容单体采用日本贵弥功公司的产品（2300F*2.5V*1.2mΩ），单体排列方式为204串*2并，可得超级电容器组额定标称参数，如表1所示：

表1 超级电容器组参数

额定容量值 /F	额定电压/V	等效串联内阻/Ω
22.5	510V	0.1224

2.2 参数识别

在超级电容器组的简化等效电路模型中，等效串联内阻ESR的大小一般不随外界因素的变化而变化；而当超级电容器组的充放电实验条件确定后，影响其等效电路中可变电容大小的主要因素为超级电容器组的实际工作电压。为了对实验中的超级电容器组进行参数识别，设计了6组超级电容充电实验，在实验中，保持充放电频率不变，分别将超级电容器组充电至50V、100V、150V、200V、250V以及300V。

根据下式可计算出不同组实验中超级电容器组的实际容量值：

$$C_{sc} = \frac{Q_{SC}}{\Delta U_{SC}} = \frac{\int I_{SC} dt}{\Delta U_{SC}} = \frac{I_{SC} \Delta T}{\Delta U_C - \Delta U_{ESR}} \quad (2)$$

式中： Q_{SC} 为超级电容充放电电荷量； ΔU_{SC} 为充放电过程中实际电压改变量； I_{SC} 为超级电容充放电电流； ΔT 为超级电容充放电时间； ΔU_C 为充放电过程中总电压改变量； ΔU_{ESR} 为ESR造成的电压突变。

由（U，C）数据点采用线性拟合的方法，可得到超级电容容量随电压变化的表达式：

$$\begin{aligned} C_{actual} &= \Delta C + C_0 = K_v U_{charge} + C_0 \\ &= 0.0129 U_{charge} + 15.5 \end{aligned} \quad (3)$$

式中： C_{actual} 为超级电容在不同电压下的实际容量； ΔC 为可变电容大小； C_0 为超级电容容量初值； K_v 为超级电容容量随电压的变化系数； U_{charge} 为超级电容器两端实际电压。

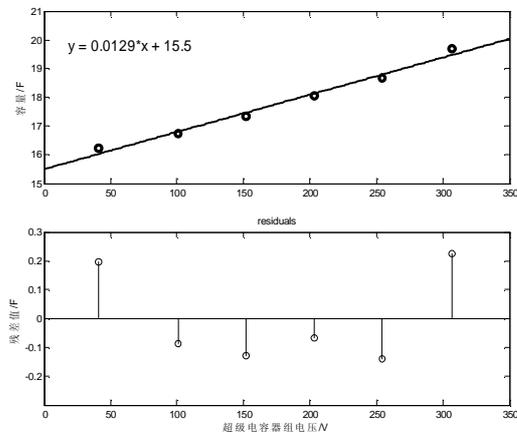


图7 超级电容容量—电压关系的线性拟合

图7给出了根据散点得到的U-C曲线以及各点的残差值。可见，各点处残差值在 $\pm 0.3F$ 以内，且经拟合分析可知：曲线误差平方和SSE（Sum of Squares due to Error）为0.1373，判定系数 R^2 为0.9833，分别比较接近0和1，说明曲线具有良好的拟合优度。

当超级电容达到额定电压510V时，带入式(3)可得此时拟合出的超级电容容量为22.1F，与贵弥功公司给出的22.5F较为接近，也从另一个角度说明了曲线拟合的合理性。

2.3 仿真模型与实验结果对比

为了更好地说明超级电容器组简化等效电路模型及其参数识别的合理性，在Matlab/Simulink中搭建了超级电容器组简化等效电路的仿真模型，并与实测超级电容充放电电压波形进行了对比，实验数据和仿真结果有很好的—致性，如表2所示：

表2 充放电实验参数

参数	数值	单位
充电电流 I_{charge}	50	A
放电电流 $I_{discharge}$	50	A
电压范围 U_{SC}	0~300	V
充电时间 t_{charge}	128	s
保持时间 t_{hold}	27	s
放电时间 $t_{discharge}$	125	s
等效串联电阻ESR	0.1224	Ω
等效串联电感L	25	nH
实际容量 C_{actual}	19.37	F

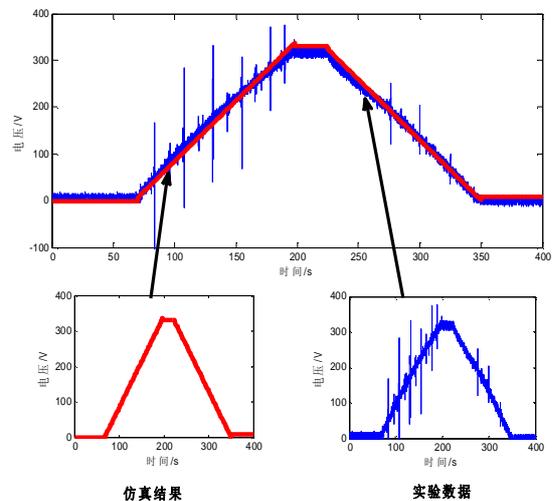


图8 超级电容器组简化等效电路模型仿真与实验对比

在图8中，左下角为简化等效电路模型的仿真结果，右下角为实际实验结果，上方为仿真与实验对比效果图；可见，在实验的超级电容器组参数、充放电时间、工作电压等级等条件下，采用图4中的超级电容器组简化等效电路模型即可满足精确性要求。

3 超级电容器组工作特性分析

3.1 等效简化模型的频域分析

在超级电容器组应用于城市轨道交通的过程中，由于其长期工作于秒级的快速充放电状态，所以应对超级电容器组简化等效电路模型进行频域分析，进而得到适合超级电容器组长期工作的充放电频率段。

超级电容器组的充放电频率可表示为：

$$f = \frac{1}{t_{charge} + t_{discharge}} \quad (4)$$

式中： t_{charge} 为超级电容充电时间； $t_{discharge}$ 为超级电容放电时间。

超级电容器组的复频域阻抗表达式为（考虑超级电容器组内部等效电感）：

$$Z(s) = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{Cs} \quad (5)$$

代入表2中的相关参数，并画出Bode特性图如下：

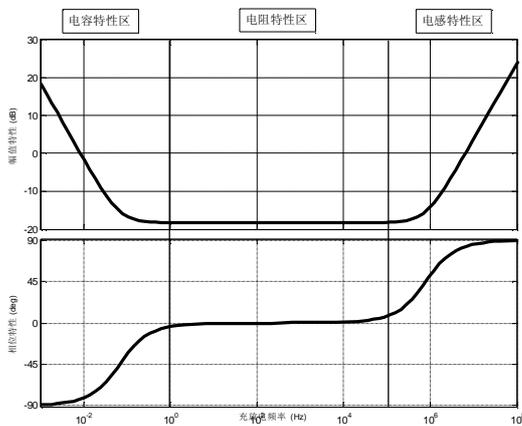


图9 超级电容器组等效阻抗Bode图

可见，在全频率范围内，超级电容的等效内阻分为电容特性区、电阻特性区和电感特性区三个部分：

①在低频区，超级电容容抗起主要作用，随着频率的升高，超级电容逐渐向阻性过渡；

②当 $f=1\text{Hz}$ 时：超级电容进入电阻特性区，在此后的较宽频率范围内，超级电容表现为纯阻性，由于超级电容的ESR较小，所以超级电容在该频段可理解为短路；

③当 $f=118\text{kHz}$ 时，超级电容进入电感特性区，超级电容对外表现感抗。

对于城市轨道交通的应用而言，为了超级电容储能系统和整个牵引网络的安全，应保证超级电容器组工作在电容特性区；且由于超级电容进入电感特性区的转折频率非常高，所以在实际应用过程中超级电容器组的内部等效电感效应可以忽略。

为了进一步验证超级电容器组充放电频率与超级电容容量之间的关系，设计了6组实验，实验中超级电容的最高充放电电压固定为50V，分别采用10A、20A、40A、60A、80A和100A的充放电电流对超级电容进行充放电。

则可得到实验中超级电容器组容量随充放电频率的变化曲线如图10所示：

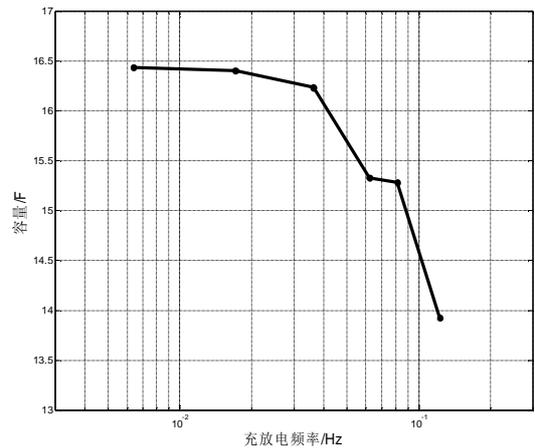


图10 超级电容器组容量—频率特性图

可见，超级电容器组的实际容量随充放电频率的增加而减小，频率变化区间与图9中的电容特性区相一致，从而验证了超级电容器组简化等效电路模型频域分析的正确性。

3.2 接触网电压波动规律对超级电容器组的影响

根据超级电容储能装置的控制策略，通常将直流牵引网母线电压作为超级电容充放电的动作指令：母线电压超过动作指令上限 U_{up} 时，超级电容充电，抑制母线电压抬升；当母线电压低于动作指令下限 U_{down} 时，超级电容放电，减小母线电压跌落。母线电压与动作指令间误差越大，超级电容充放电功率越大。

图11给出某地铁牵引变电站高峰时段直流网母线电压变化的实测波形：

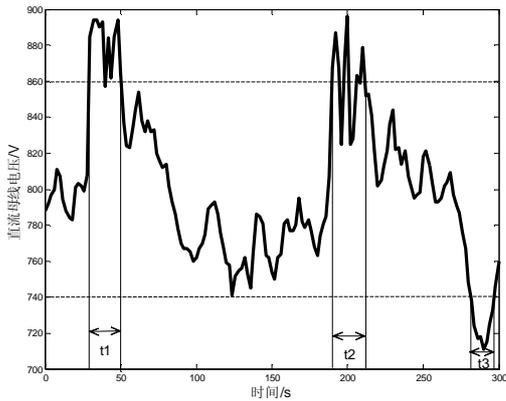


图11 直流牵引网母线电压波动

设 $U_{up}=860V$, $U_{down}=740V$, 则整个时间段内有三段时间超级电容动作: t_1 时间段内超级电容均处于充电状态, 但在 t_1 中段充电功率较小, 整个过程持续20s; t_2 时间段由三个充电过程组成, 充电功率为脉冲型, 每个脉冲持续时间5s, 整个过程持续22s; t_3 时间段内超级电容处于放电状态, 放电功率仍为脉冲状, 整个过程持续16s; 其余时间超级电容处于备用状态。

t_1 、 t_2 、 t_3 时间段内对应的充放电频率分别为0.025Hz、0.1Hz和0.03125Hz; 接下来统计了某牵引变电站高峰时段1h内的超级电容器组的理论动作次数及对应的充放电频率, 如图12所示:

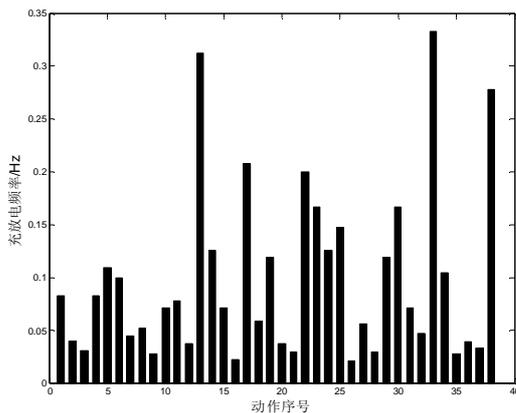


图12 超级电容器组充放电频率统计

从上图可见, 超级电容器组在1h的时间范围内动作38次, 充放电频率范围为: 0~0.35Hz, 该频段位于超级电容器组的电容特性区, 超级电容储能系统可安全可靠工作; 其中充放电频率在0.3Hz以下的共有36次, 占94.7%; 为保证超级电容储能系统尽可能发挥其储能性能, 可在控制策略中将充放电频率在0.3Hz以上的动作指令滤除。

4 结论

在城市轨道交通的应用中, 找到一种适合于城市轨道交通工况的超级电容器组等效电路模型对准确表述其电气性能和工作状态非常重要。

①在超级电容通用等效电路基础上针对应用条件进行了简化, 得到了带可变电容器的一阶 RC 超级电容器组简化等效电路模型;

②对超级电容器组进行了参数识别, 通过仿真结果和实验数据对比的方式说明了超级电容器组简化等效电路的合理性;

③针对实验中的超级电容器组参数, 分析了简化等效电路模型的频域响应, 将简化等效电路模型的 Bode 特性分为电容特性区、电阻特性区和电感特性区, 且转折频率分别为 1Hz 和 118kHz;

④结合城轨接触网电压波动规律对超级电容器组的充放电频率进行了统计分析, 结果表明超级电容器组的工作频率在 0~0.35Hz 之间, 属电容特性区, 超级电容储能系统可安全可靠的工作。

参考文献

- [1] 邓文豪, 肖彦君, 吴茂杉. 基于列车制动的超级电容型储能系统的参数设计与控制[J]. 铁道机车车辆, 2012: 58-62
- [2] 许爱国, 谢少军, 姚远, 等. 基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J]. 电工技术学报, 2010: 117-123
- [3] 刘伟. 基于超级电容的地铁再生制动能量存储利用研究[D]. 2008
- [4] 赵洋, 梁海泉, 张逸成. 电化学超级电容器建模研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2012: 188-195
- [5] 李海东. 超级电容器模块化技术的研究[D]. 2006
- [6] F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, etc. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling[J]. Journal of Power Sources, 2007:928-934.
- [7] Tsusuyoshi Funaki, Takashi Hikiyara. Characterization and Modeling of the Voltage Dependency of Capacitance and Impedance Frequency Characteristics of Packed EDLCs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008:1518-1525.