



超级电容动态参数等效电路模型及实时辨识方法

摘要

针对超级电容传统静态参数等效电路模型不能有效反映其动态工作特性问题,提出一种包含动态充放电内阻和电容参数的二阶梯形等效电路模型,利用递推最小二乘法对二阶梯形等效电路模型参数进行初步离线辨识.进一步,考虑超级电容参数的动态变化,将离线辨识模型参数作为初值,引入带遗忘因子的递推最小二乘法对动态参数进行实时辨识.搭建超级电容仿真模型和实验测试平台,通过仿真和实验结果对比验证动态参数二阶梯形等效电路模型和实时辨识方法的有效性和准确性.结果表明:动态参数二阶梯形等效电路模型可以有效反映超级电容的动态充放电工作特性,与传统静态参数的三支等效电路模型和二阶梯形等效电路模型相比,模型的精度分别提高2.08和3.56个百分点.

关键词

超级电容;等效电路模型;动态参数;实时辨识;递推最小二乘法

中图分类号 TM53

文献标志码 A

收稿日期 2022-12-05

资助项目 国家电网有限公司科技项目(SGJBJZJ00FZJS2250089);国家自然科学基金(52206109)

作者简介

高全成,男,高级工程师,研究方向为超级电容在微电网储能系统中的应用.19860829dxl@163.com

王斌(通信作者),男,副研究员,研究方向为电源系统、锂电池和超级电容建模和状态评估.wangbin8751@xjtu.edu.cn

- 1 国网冀北电力有限公司张家口供电公司,张家口,075000
- 2 西安交通大学 机械工程学院,西安,710049
- 3 西安建筑科技大学 机电工程学院,西安,710055

0 引言

在电源供电和新能源发电/储能应用领域,锂电池和超级电容被广泛应用^[1-3].不同于锂电池,超级电容能量密度偏低,但具有功率密度高、充放电速度快和频繁充放电不影响其使用寿命等优点^[1,4].因此,超级电容被广泛用作缓冲电源、应急电源或启动电源.在新能源发电/储能等应用领域,超级电容还可以有效平抑功率波动对风电储能系统和电网的负面影响^[5-6].作为一种颇具应用前景的供电和储能器件,国内外近年来对超级电容的应用研究非常引人关注^[6-9].

为有效控制超级电容储能系统,超级电容的内部参数辨识尤为重要^[7,9].超级电容的内部参数涉及实时容量、充放电内阻和自放电内阻等,这些内部参数是反映超级电容放电程度、可用电量或最大放电功率的关键参数^[7,9-10].为了辨识超级电容内部参数,学者们提出了许多建模和参数辨识方法^[10-13].其中,最常用的超级电容建模方法是传统的静态参数三支等效电路模型^[5,14-15].在静态参数三支等效电路模型中,不同的分支具有不同的时间常数,能反映超级电容不同时刻的充放电工作特性和静置特性.但是,静态参数三支等效电路模型参数过多,参数辨识过程复杂,且离线估计的静态参数在实际应用时又会导致较大的模型误差和误差累积现象,这不利于模型的实际应用^[14-15].

从超级电容内部的结构来看,超级电容电极由多孔材料构成,其特有的大孔、中孔和微孔结构可以通过多阶梯形等效电路模型来描述,通过电路的不同时间常数反映超级电容的工作特性^[9].进一步,一些研究者提出,在连续工作状态或静置时间较短的充放电工况下,多阶梯形等效电路模型可以等效为低阶梯形等效电路模型^[8-9,16].与三支等效电路模型相比,低阶梯形等效电路模型的结构简单并且参数少,利于辨识.一些研究表明,基于离线参数辨识方法的低阶梯形等效电路模型在简单工况应用时具有较好的精度^[8,16].但是,超级电容在连续变化充放电过程中等效电阻和电容参数是动态变化的^[17-18].如何采用简化的低阶等效电路模型描述超级电容工作特性随充放电工况变化有待进一步研究.

目前,针对超级电容等效电路模型的参数辨识,应用较多的主要为递推最小二乘法、卡尔曼滤波算法、粒子群算法及基于大数据的人工神经网络辨识方法等^[12-13,19-21].其中:卡尔曼滤波算法一般应用于参

数较少的动态模型,可以实现十分精确的在线参数辨识^[13];粒子群算法需要多次辨识和分析模型参数,结果会受到数据饱和的影响^[12];人工神经网络方法则是基于大量的实验数据样本对等效电路模型参数进行辨识,在动态模型应用中受限于计算和存储单元的性能^[21].相比于其他参数辨识方法,递推最小二乘法最为简单和实用^[17,22].然而,对长期循环充放电的超级电容进行参数辨识时,由于递推最小二乘法需要根据过去数据进行递推,随着递推次数的增加,会出现数据饱和问题,过去数据会淹没新数据的信息,将导致超级电容模型出现不可逆的误差积累.

为解决超级电容传统静态等效电路模型误差大、不能有效反映其动态工作特性等问题,本文提出一种包含动态充放电内阻、电容参数和静态自放电内阻参数的二阶梯形等效电路模型.通过仿真和实验表明,忽略静态自放电内阻不影响超级电容动态充放电内阻和电容参数的辨识结果.为避免超级电容内部参数初值选取不合理,基于完整的充放电和静置工况进行参数离线辨识,将离线辨识的等效电路模型参数作为初值,引入带遗忘因子的递推最小二乘法对超级电容等效电路模型的动态参数进行实时辨识,有效避免了误差累积现象.最后,通过仿真和实验结果对比证明了动态参数二阶梯形等效电路模型的有效性和准确性.

1 超级电容动态参数等效电路模型

目前,超级电容已经被广泛应用于超快响应电源、车载启动电源、公共汽车和地铁列车储能供电系统、多电飞机应急电源等应用领域^[1-2,7].已经得到广泛应用的超级电容可分为双电层电容(Double Electric Layer Capacitor, DELC)和法拉第赝电容(Faraday pseudocapacitor)两种^[1,7].其中,最具有代

表性的是 Maxwell 双电层超级电容.由于双电层超级电容在充放电过程中没有发生伴随的化学反应,其充放电过程是“镜像”的,反映了典型的电容工作特性,因此过去对超级电容的建模和参数辨识研究多数是基于双电层结构开展的.

双电层超级电容的电极材料具有多孔结构特点.根据电极上不同孔隙的大小,分为大孔、中孔和微孔结构.如果这些孔隙大小均匀,可等效为理想的三阶梯形等效电路,如图 1a 所示.在实际的生产过程中,受制作工艺和材料的影响,电极材料上的孔隙是不规则的.因此,为了在等效电路模型中体现不同孔隙对超级电容参数产生的影响,理论上需要多阶梯形等效电路来描述超级电容的工作特性.但是多阶梯形等效电路同样会增加模型的参数,导致参数实时辨识困难.为简化模型,在简单的充放电工况下,可采用二阶梯形等效电路描述超级电容的工作特性,如图 1b 所示.该模型的第二阶 R_2 和 C_2 可以看成是中孔和微孔等效电路合并后的等效电路,在连续变化的充放电工况下,由于超级电容长期静置对应的自放电内阻高达几千欧姆,与短期几十欧姆的自放电内阻并联后等效自放电内阻几乎不变,因此忽略长期自放电内阻对短期自放电内阻辨识结果影响十分微小,中期自放电内阻可以等效叠加到短期自放电内阻上.

在简单的充放电工况下,图 1b 所示的等效电路模型有较好的模型精度.但是,超级电容充放电内阻和容量随充放电工况变化而动态变化,因此采用动态变化的模型参数可以更有效地描述超级电容的动态工作特性.为此,本文提出包含动态充放电内阻、电容参数和静态自放电内阻参数的二阶梯形等效电路模型.进一步,由于漏电流和电荷再分布现象的存在,超级电容在充放电阶段和静置阶段均具有自放电效应.考虑充放电和静置期间的自放电效应,等效

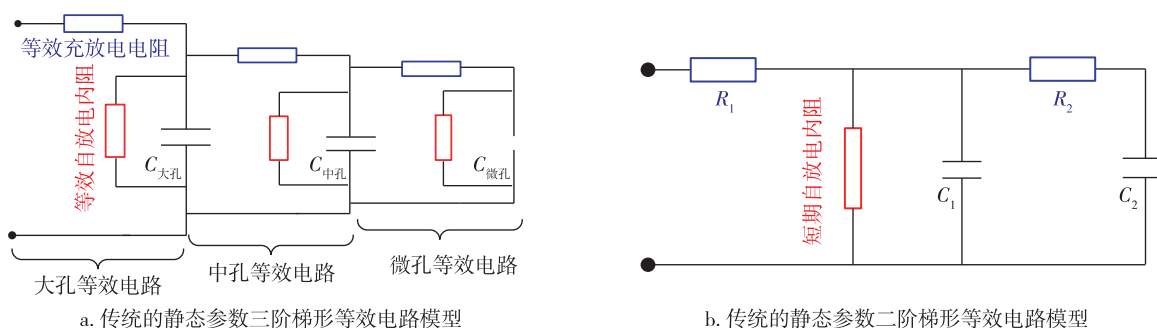


图 1 超级电容传统的梯形等效电路模型

Fig. 1 Traditional ladder equivalent circuit models of supercapacitor

电路模型保留了一个自放电内阻.由于自放电内阻相对较大,微小的变化不会影响模型精度,因此设计自放电内阻是静态的.所提出的动态参数二阶梯形等效电路模型如图2所示.

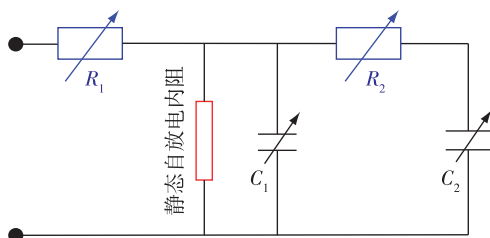


图2 动态参数二阶梯形等效电路模型
Fig. 2 Second-order ladder equivalent circuit model with dynamic parameters

2 动态参数实时辨识

基于图2所示的动态参数二阶等效电路模型,将引入带遗忘因子的递推最小二乘法对动态模型参数进行实时辨识.首先,图2所示等效电路的传递函数为

$$G(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = [R_{\text{self}}R_2R_1C_2C_1s^2 + (R_{\text{self}}R_2C_2 + R_{\text{self}}R_1C_2 + R_{\text{self}}R_1C_1 + R_2R_1C_2)s + R_1 + R_{\text{self}}] \times [R_{\text{self}}R_2C_2C_1s^2 + (R_{\text{self}}C_2 + R_{\text{self}}C_1 + R_2C_2)s + 1]^{-1}, \quad (1)$$

式中: R_{self} 是静态自放电内阻.

为便于计算,令 $R_3 = R_{\text{self}}$,并将传递函数 $G(s)$ 写成如下形式:

$$G(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^2 + a_1s + a_0}. \quad (2)$$

对比式(1)~(2),可以得到:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{R_3R_2C_2C_1}, a_1 = \frac{R_3C_2 + R_3C_1 + R_2C_2}{R_3R_2C_2C_1}, \\ b_0 = \frac{R_1 + R_3}{R_3R_2C_2C_1}, \\ b_1 = \frac{R_3R_2C_2 + R_3R_1C_2 + R_3R_1C_1 + R_2R_1C_2}{R_3R_2C_2C_1}, \\ b_2 = \frac{R_3R_2R_1C_2C_1}{R_3R_2C_2C_1} = R_1. \end{cases} \quad (3)$$

进一步,为了辨识模型参数,需要对传递函数进行离散化.离散化方法包括后向差分法、前向差分法和双线性变换法等.由于后向差分法需要很小的采样周期才能保证模型精确,不太适合工程应用,而前

向差分法会导致结果出现很大的偏差,因此选择双线性变换法,该方法应用于低频响应会取得较好的效果,十分实用.双线性变换公式为

$$s = \frac{2(1 - Z^{-1})}{T(1 + Z^{-1})}. \quad (4)$$

基于双线性变换,可以得到:

$$G(Z) = \frac{\beta_2Z^{-2} + \beta_1Z^{-1} + \beta_0}{\alpha_2Z^{-2} + \alpha_1Z^{-1} + 1}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{4 - 2a_1T + a_0T^2}{4 + 2a_1T + a_0T^2}, \alpha_1 = \frac{-8 + 2a_0T^2}{4 + 2a_1T + a_0T^2}, \\ \beta_2 = \frac{4b_2 - 2b_1T + b_0T^2}{4 + 2a_1T + a_0T^2}, \beta_1 = \frac{-8b_2 + 2b_0T^2}{4 + 2a_1T + a_0T^2}, \\ \beta_0 = \frac{4b_2 + 2b_1T + b_0T^2}{4 + 2a_1T + a_0T^2}. \end{cases} \quad (6)$$

相应的差分方程为

$$V(z) + \alpha_1V(z-1) + \alpha_2V(z-2) = \beta_0I(z) + \beta_1I(z-1) + \beta_2I(z-2). \quad (7)$$

令:

$$\theta = [-\alpha_1, -\alpha_2, \beta_0, \beta_1, \beta_2], \quad (8)$$

$$h(z) = [V(z-1), V(z-2), I(z), I(z-1), I(z-2)]^T. \quad (9)$$

则基于最小二乘法的辨识方程可以表示为

$$V(z) = \theta h(z). \quad (10)$$

采用递推最小二乘法进行参数辨识,相应的公式为

$$\begin{cases} k[n] = \frac{P[n-1]h[n]}{\lambda + h^T[n]P[n-1]h[n]}, \\ \varepsilon[n] = V[n] - \hat{\theta}[n-1]h[n], \\ \hat{\theta}[n] = \hat{\theta}[n-1] + k[n]\varepsilon[n], \\ P[n] = \lambda^{-1}P[n-1] - \lambda^{-1}k[n]h^T[n]P[n-1]. \end{cases} \quad (11)$$

式中:当 $\lambda = 1$ 时,为递推最小二乘法;当 $\lambda < 1$ 时,则变为带遗忘因子的递推最小二乘法.在辨识时有5个模型参数,即 $R_1 \sim R_3$ 和 $C_1 \sim C_2$,定义为5参数辨识方法.

根据测试得到的超级电容输出电压和工作电流数据,设计采样周期 $T = 1$ s,结合式(10)和式(11)的递推最小二乘法可辨识参数 θ ,再通过对式(3)和式(6),就可以离线辨识对应的模型参数.递推最小二乘法容易实现,而且在简单工况下会有较高的精度.但是,超级电容在充放电/静置工况突变时,等

效内阻和电容等参数是动态变化的,递推最小二乘法受前期采样数据的影响,会有一定的误差累积现象,因此不适合参数的实时辨识.在递推最小二乘法的基础上引入遗忘因子,将使前期数据的权重随新数据的增加逐渐减弱,能够有效避免数据过饱和和现象.

尽管如此,过多的参数极有可能在实时辨识过程中出现无效解或奇异解.例如:自放电内阻在充放电/静置工况突变时,辨识结果为负值,是一个无效解或无意义解.为了简化辨识过程,本文通过仿真和实验发现:自放电内阻的参数小幅度变化不会影响超级电容模型精度和其他动态参数辨识结果.因此在充放电工况下可忽略静态自放电内阻进行模型的动态参数辨识.相应的传递函数变为

$$G(s) = \frac{R_2 R_1 C_2 C_1 s^2 + (R_1 C_2 + R_1 C_1 + R_2 C_2) s + 1}{R_2 C_2 C_1 s^2 + (C_2 + C_1) s} \quad (12)$$

对比式(2),可以得到:

$$\begin{cases} a_0 = 0, a_1 = \frac{C_2 + C_1}{R_2 C_2 C_1}, \\ b_0 = \frac{1}{R_2 C_2 C_1}, b_1 = \frac{R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1}{R_2 C_2 C_1}, b_2 = R_1. \end{cases} \quad (13)$$

同样地,对式(12)采用双线性变换进行离散化,并与式(5)进行对比,有

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{4 - 2a_1 T}{4 + 2a_1 T}, \alpha_1 = \frac{-8}{4 + 2a_1 T}, \\ \beta_2 = \frac{4b_2 - 2b_1 T + b_0 T^2}{4 + 2a_1 T}, \beta_1 = \frac{2b_0 T^2 - 8b_2}{4 + 2a_1 T}, \\ \beta_0 = \frac{4b_2 + 2b_1 T + b_0 T^2}{4 + 2a_1 T}. \end{cases} \quad (14)$$

相比于式(3)和式(6)对应的5参数辨识方法,式(13)和式(14)辨识参数为4个,对应的4参数辨识方法与5参数辨识方法相比,计算相对简化,递推最小二乘法实时辨识更少的参数,避免了无效解或无意义解.同时,为了防止由于数据过多导致的数据过饱和,设计遗忘因子 $\lambda = 0.96$, 减弱前期数据权重,就可以实现基于遗忘因子递推最小二乘法的实时参数辨识.

3 仿真和实验对比分析

为验证动态参数二阶梯形等效电路模型和实时辨识方法的有效性和准确性,搭建了超级电容实验

测试平台,如图3所示.为避免外部环境因素干扰,在恒温恒湿条件下,采用新威电池测试系统对超级电容进行实验测试,通过电压传感器和电流传感器分别采集超级电容的输出电压和工作电流数据,采样周期为1s,采集数据经过处理后将实时储存于上位机,并通过监测系统显示.



图3 超级电容实验测试平台

Fig. 3 Experimental test platform for supercapacitor

同时,搭建超级电容的二阶梯形等效电路模型,如图4所示.在仿真时,由于自放电内阻会导致部分充放电能量损失,因此不可忽略.但是,自放电内阻的小幅度变化不会影响超级电容模型精度,在仿真时将忽略自放电内阻的动态变化,所以 R_3 设计为恒定值, R_1 、 R_2 、 C_1 和 C_2 设定为动态变化的参数,跟随超级电容不同充放电或静置工况的参数辨识结果动态变化.动态变化参数将通过后台运行脚本文件嵌入仿真模型.因此,该模型仿真结果可以有效反映超级电容的动态工作特性.

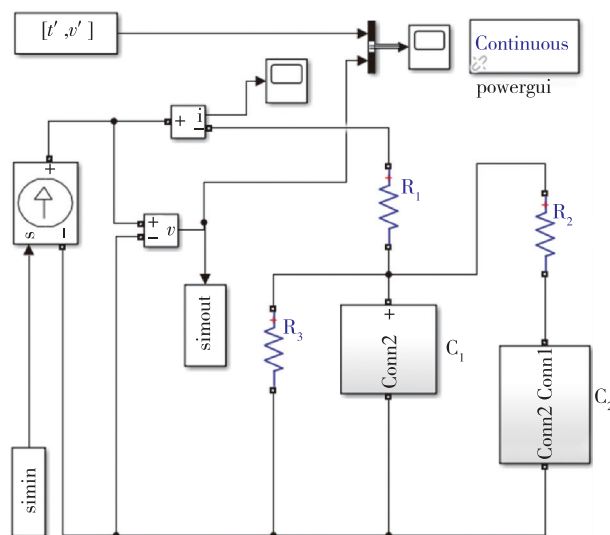


图4 超级电容二阶梯形等效电路仿真模型

Fig. 4 Second-order equivalent circuit model of supercapacitor

基于搭建的实验测试平台和仿真模型,超级电容动态参数等效电路模型的实时辨识及验证流程如图5所示.首先,通过实验测试获取超级电容的输出电压和工作电流数据.然后,采用递推最小二乘法对二阶梯形等效电路模型参数进行初步离线辨识.进一步,将离线辨识的静态参数作为初值,引入带遗忘因子的递推最小二乘法对模型动态参数进行实时辨识.最后,将实时参数辨识结果嵌入仿真模型,通过仿真和实验结果对比验证动态参数等效电路模型和实时辨识方法的有效性和准确性.

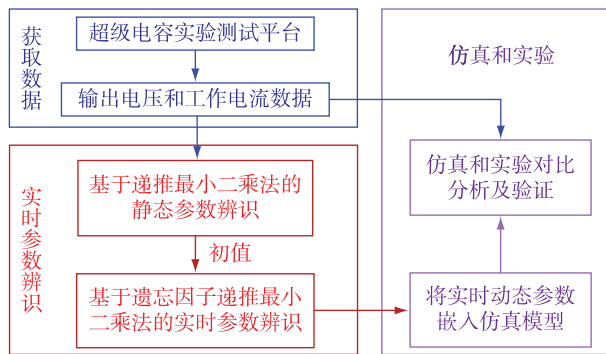


图5 超级电容参数辨识及分析验证流程
Fig. 5 Supercapacitor parameter identification and analysis verification process

选用 Maxwell 350 F 超级电容进行实验测试和仿真分析,该超级电容的额定电压、额定容量、最大工作电压、最大工作电流和实验标定内阻如表1所示.用于标定的实验工况对应的输出电压和工作电流如图6a所示.该实验工况依次包含静置阶段、充电阶段、充电后静置阶段、放电阶段和放电后静置阶段,可有效反映超级电容各阶段的不同工作特性.

表1 Maxwell 超级电容规格参数

Table 1 Specification parameters of Maxwell supercapacitor

参数	数值
额定电压/V	2.7
额定容量/F	350
最大工作电压/V	2.85
最大工作电流/A	170
实验标定内阻/mΩ	1.27

基于图6a完整的充放电和静置工况,分别采用上一节的5参数辨识和4参数辨识方法进行初步的离线参数辨识,得到的结果如表2所示.可以看出,两种方法对应的等效充放电内阻和电容的辨识参数十分相近.

表2 不同参数模型的辨识结果

Table 2 Identified results of different parameter models

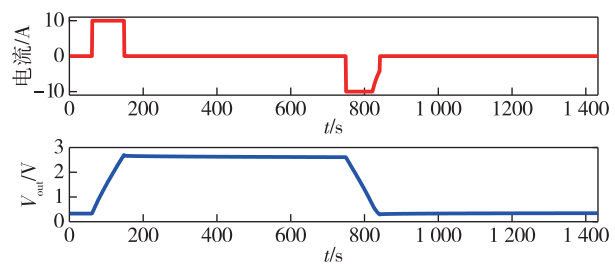
辨识参数/个	$R_1/m\Omega$	$R_2/m\Omega$	C_1/F	C_2/F	R_3/Ω
5	1.03	0.52	255.092	98.709	56.256
4	1.03	0.52	255.093	98.678	忽略

将表2中5参数辨识和4参数辨识结果分别代入图4的仿真模型进行仿真,模型输出电压如图6b所示.在仿真时,4参数辨识方法的自放电内阻等于5参数辨识方法的自放电内阻,虽然忽略自放电内阻不会影响动态参数的辨识结果,但自放电内阻会消耗部分电量,因此仿真时自放电内阻不可忽略.在后续的动态参数等效电路模型仿真时,自放电内阻同样等于5参数辨识方法得到的结果.由图6b可以看出,4参数辨识方法和5参数辨识方法的仿真模型输出电压几乎重合.实际上,两种辨识方法的等效内阻 R_1 和 R_2 完全相同,等效电容 C_1 和 C_2 差别几乎可以忽略.相应地,两种辨识方法对应的仿真模型输出电压同样不会发生明显变化.

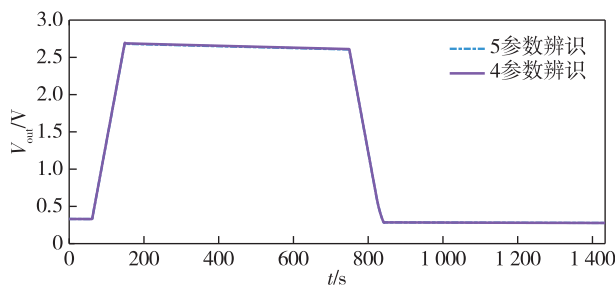
进一步,将表2中4参数辨识方法得到的结果作为二阶梯形等效电路模型动态变化参数的初值,采用带遗忘因子的递推最小二乘法对超级电容内部参数进行实时辨识,得到动态变化的等效内阻和电容参数如图6c所示.可以看出,超级电容在充放电工况变化时会发生一定的等效内阻和电容变化,在静置后会保持稳定,有效反映了超级电容的内阻和容量随充放电工况变化而动态变化的工作特性.在静置自放电过程中,内部参数保持不变,其主要原因是超级电容输出电压和工作电流均未发生明显变化.超级电容内部参数变化主要发生在静置转变为充电工况,或者由静置转化为放电工况.

在实际储能与供电应用时,超级电容将处于频繁的充放电过程中.为验证超级电容动态参数等效电路和实时辨识方法在频繁充放电过程中的有效性,对超级电容在如图7a所示的工况进行实验测试和仿真,相应的参数辨识结果如图7b所示.超级电容在充电完毕后,自放电效应明显,如果没有静置阶段,部分自放电效应会叠加合并到放电阶段,导致第一级等效内阻增大,因此实时放电过程辨识得到的等效内阻 R_1 大于充电过程辨识得到的等效内阻 R_1 .

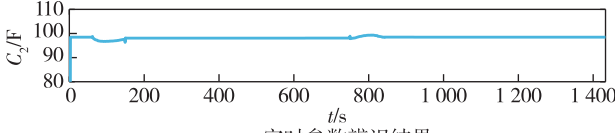
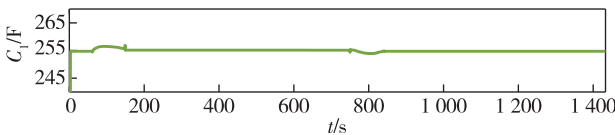
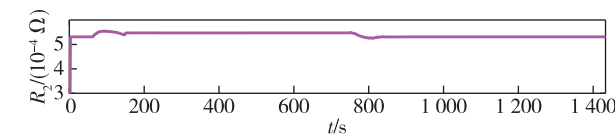
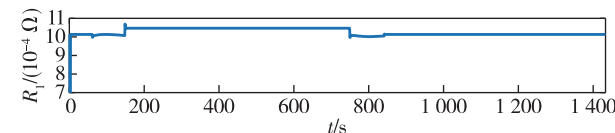
相应地,第一级和第二级的等效电容和电阻也会发生一定的波动.其中,等效内阻的动态变化波动在5%左右,等效电容的动态变化波动在2%左右.图6和图7参数辨识结果表明:不同充放电工况或静置



a. 充放电和静置工况



b. 5参数辨识和4参数辨识方法仿真对比



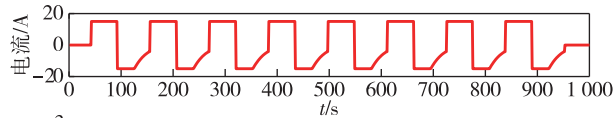
c. 实时参数辨识结果

图6 充放电和静置工况下仿真和实时参数辨识结果

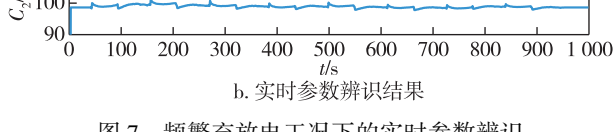
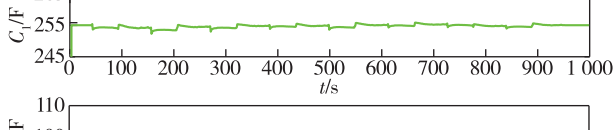
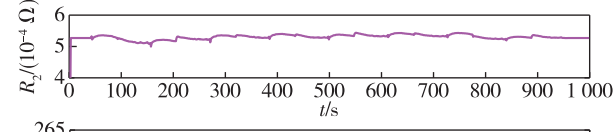
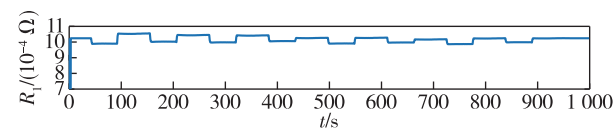
Fig. 6 Simulation and real-time parameter identification under charging/discharging and static operating conditions

工况会显著影响超级电容的内部参数.此外,所辨识的 C_1 和 C_2 之和接近超级电容的额定容量,验证了超级电容容量参数辨识的有效性和准确性.

将上述实时辨识参数嵌入到超级电容的仿真模型,进行仿真,并将动态参数二阶梯形等效电路模型的仿真结果与实验结果、传统静态参数三支等效电路模型和静态参数二阶梯形等效电路模型的仿真结果进行对比分析,如图8所示.可以看出,在两种工况下,动态参数二阶梯形等效电路模型的仿真输出电压可以很好地跟踪超级电容的实验测试电压,仅在充放电工况向静置工况突变时出现微小偏差.以超级电容



a. 频繁充放电工况

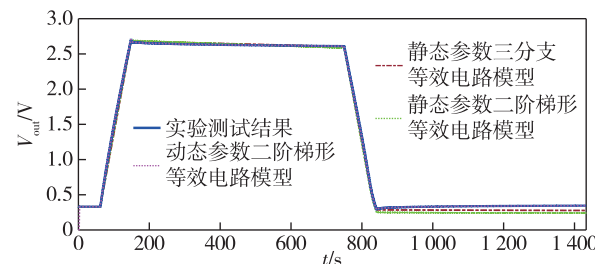


b. 实时参数辨识结果

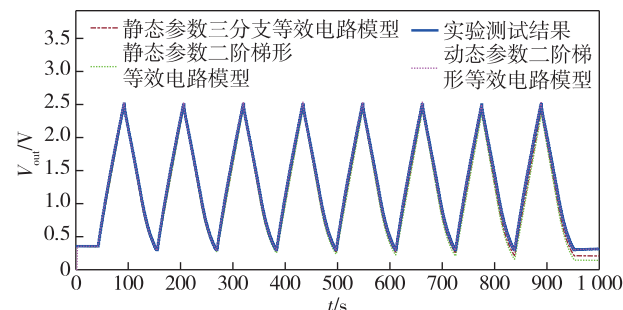
图7 频繁充放电工况下的实时参数辨识

Fig. 7 Real-time parameter identification under frequent charging/discharging operating conditions

的额定电压值为基准,三种等效电路模型的误差对比如表3所示:在两种工况下,所提出的动态参数二阶梯形等效电路模型的误差分别低于0.37%和0.34%.



a. 充放电和静置工况的仿真和实验结果比较



b. 频繁充放电工况的仿真和实验结果比较

图8 两种工况的仿真和实验结果比较

Fig. 8 Comparison of simulation and experimental results under two operating conditions

传统静态参数三支等效电路模型和静态参数二阶梯形等效电路模型的仿真结果在初始阶段能较好地跟踪实验测试结果.但是,随着时间的推移,特别是在放电工况结束后,误差尤为明显.并且,由于参数是静态的,会出现误差累积现象.在连续频繁的充放电工况下,误差逐渐增大.在两种工况静置阶段末期,传统静态参数三支等效电路模型误差将分别超过 2.45% 和 4.08%,而静态参数二阶梯形等效电路模型的误差将更大,达到 3.93% 和 6.67%.因此,相比于传统静态参数的三支等效电路模型或二阶梯形等效电路模型,所提出的动态参数二阶梯形等效电路模型精度分别提高 2.08 和 3.56 个百分点.

表 3 三种等效电路模型的误差对比

Table 3 Error comparison of three equivalent circuit models %

等效电路模型类型	充放电和静置工况下最大误差	频繁充放电工况下最大误差
静态参数三支等效电路模型	2.45	4.08
静态参数二阶梯形等效电路模型	3.93	6.67
动态参数二阶梯形等效电路模型	0.37	0.34

4 结论

针对超级电容传统的静态参数等效电路模型误差大、不能有效反映其动态工作特性等问题,在超级电容传统静态参数二阶梯形等效电路模型的基础上,采用动态充放电内阻和电容反映超级电容的动态充放电工作特性,并保留一个静态自放电内阻反映超级电容的自放电工作特性.利用递推最小二乘法进行离线参数辨识,获得动态参数二阶梯形等效电路模型的初值.进一步,考虑超级电容充放电内阻和电容随充放电工况交替变化而动态变化情况,引入带遗忘因子的递推最小二乘法对动态参数进行实时辨识,提高超级电容模型的精度.

搭建了超级电容仿真模型和实验测试平台,选用 Maxwell 350 F 超级电容进行仿真和实验验证.在两种不同工况下,参数辨识结果验证了超级电容等效内阻和电容随充放电工况和静置工况变化而动态变化的工作特性.结果表明,动态参数二阶梯形等效电路模型的仿真输出电压可以有效跟随超级电容实测电压,与传统静态参数三支等效电路模型和静态参数二阶梯形等效电路模型相比,模型的精度分

别提高 2.08 和 3.56 个百分点.

所提出的超级电容动态参数二阶梯形等效电路模型及实时辨识方法简单可靠,参数估计准确,模型精度高,对超级电容实时输出电压追踪和内部状态评估十分实用.此外,在超级电容的长期充放电过程中,其内部容量、最大充放电功率会随使用周期增加和工作环境变化发生衰减情况.因此,超级电容可用能量状态、功率状态和健康状态评估将是未来的重点研究内容.

参考文献

References

- [1] Olabi A G, Abbas Q, Al Makky A, et al. Supercapacitors as next generation energy storage devices: properties and applications[J]. Energy, 2022, 248: 123617
- [2] Wang B, Wang C H, Wang Z Y, et al. Adaptive energy estimation for supercapacitor based on a real-time voltage state observer in electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7337-7341
- [3] 戈斌, 罗阳, 李家玮, 等. 风光互补式电动汽车充电站储能锂电池的实时状态估计[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 55-65
GE Bin, LUO Yang, LI Jiawei, et al. Real-time state estimation of lithium batteries used for energy storage in electric vehicle charging stations with wind-solar complementary power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 55-65
- [4] 张雷, 胡晓松, 王震坡. 超级电容管理技术及在电动汽车中的应用综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 32-43, 69
ZHANG Lei, HU Xiaosong, WANG Zhenpo. Overview of supercapacitor management techniques in electrified vehicle applications [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 32-43, 69
- [5] 谢文超, 赵延明, 方紫微, 等. 带可变遗忘因子递推最小二乘法的超级电容模组等效模型参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 996-1005
XIE Wenchao, ZHAO Yanming, FANG Ziwei, et al. Variable forgetting factor recursive least squares based parameter identification method for the equivalent circuit model of the supercapacitor cell module [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 996-1005
- [6] Cano A, Arévalo P, Jurado F. Evaluation of temporal resolution impact on power fluctuations and self-consumption for a hydrokinetic on grid system using supercapacitors [J]. Renewable Energy, 2022, 193: 843-856
- [7] Wang B, Wang C H, Wang Z Y, et al. Adaptive state of energy evaluation for supercapacitor in emergency power system of more-electric aircraft [J]. Energy, 2023, 263: 125632
- [8] 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, 27(3): 188-195
ZHAO Yang, LIANG Haiquan, ZHANG Yicheng. Review

- and expectation of modeling research on electrochemical supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 188-195
- [9] Wang B, Wang C H, Hu Q, et al. Modeling the dynamic self-discharge effects of supercapacitors using a controlled current source based ladder equivalent circuit [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101473
- [10] 梁海泉, 谢维达, 孙家南, 等. 超级电容器时变等效电路模型参数辨识与仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 949-954
LIANG Haiquan, XIE Weida, SUN Jianan, et al. Parameter identification and simulation of time-varying equivalent circuit model of supercapacitor[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(6): 949-954
- [11] 王知雨, 王斌, 王朝晖. 采用非线性最小二乘法的超级电容等效电路模型参数辨识[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 10-18
WANG Zhiyu, WANG Bin, WANG Chaohui. A parameter identification method for an equivalent circuit model of supercapacitor using nonlinear least squares [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 10-18
- [12] 赵洋, 韦莉, 张逸成, 等. 基于粒子群优化的超级电容器模型结构与参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 155-161, 2
ZHAO Yang, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Structure and parameter identification of supercapacitors based on particle swarm optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 155-161, 2
- [13] Nadeau A, Hassanaliheragh M, Sharma G, et al. Energy awareness for supercapacitors using Kalman filter state-of-charge tracking [J]. Journal of Power Sources, 2015, 296: 383-391
- [14] 张乐, 续丹, 王斌, 等. 采用权值配比优化的超级电容等效电路模型参数辨识[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 96-102
ZHANG Le, XU Dan, WANG Bin, et al. Parameter identification of the equivalent circuit model of supercapacitor using weight distribution optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 96-102
- [15] Xu D, Zhang L, Wang B, et al. Modeling of supercapacitor behavior with an improved two-branch equivalent circuit [J]. IEEE Access, 2019, 7: 26379-26390
- [16] Şahin M E, Blaabjerg F, Sangwongwanich A. Modelling of supercapacitors based on simplified equivalent circuit [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(1): 31-39
- [17] 王露霄, 段建东, 张凯, 等. 超级电容快速在线参数辨识及状态估计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 57-67
WANG Luxiao, DUAN Jiandong, ZHANG Kai, et al. Fast online parameter identification and state estimation of supercapacitor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(1): 57-67
- [18] Mukhopadhyay S, Dhaouadi R, Takrouiri M, et al. Supercapacitor characterization using universal adaptive stabilization and optimization [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2020, 1: 166-183
- [19] Reichbach N, Kuperman A. Recursive-least-squares-based real-time estimation of supercapacitor parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 810-812
- [20] Naseri F, Farjah E, Ghanbari T, et al. Online parameter estimation for supercapacitor state-of-energy and state-of-health determination in vehicular applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7963-7972
- [21] Eddahech A, Briat O, Ayadi M, et al. Modeling and adaptive control for supercapacitor in automotive applications based on artificial neural networks [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 106: 134-141
- [22] 丁锋. 辅助模型辨识方法(5): 最小二乘辨识[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(5): 385-403
DING Feng. Auxiliary model based identification methods. Part 5: least squares identification [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 8(5): 385-403

Equivalent circuit model with dynamic parameters and real-time identification for supercapacitors

GAO Quancheng¹ WANG Shuai¹ ZHOU Guowei¹ WANG Bin² LI Lixia³

¹ Zhangjiakou Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075000, China

² School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

³ School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract In view of the problem that traditional static parameter equivalent circuit model of a supercapacitor cannot effectively reflect its dynamic operating characteristics, a second-order ladder equivalent circuit model including dynamic charge/discharge resistance and capacitance parameters is proposed. The recursive least square method is used for preliminary offline parameter identification of the second-order ladder equivalent circuit model. Then the offline identified model parameters are used as initial values considering the dynamic change of the supercapacitor pa-

rameters, and the recursive least square method with forgetting factor is introduced to identify the dynamic parameters of supercapacitor in real-time. Simulation model and experimental test platform of the supercapacitor are established to verify the effectiveness and accuracy of the proposed equivalent circuit model and real-time identification method through comparison of simulation and experimental results. The results show that the second-order ladder equivalent circuit model with dynamic parameters can effectively reflect the dynamic charge/discharge operating characteristics of the supercapacitor. Compared with traditional three branch and second-order ladder equivalent circuit models with static parameters, the proposed model is improved in accuracy by over 2.08% and 3.56%, respectively.

Key words supercapacitors; equivalent circuit model; dynamic parameters; real-time identification; recursive least square