

基于充放电滞回特性的超级电容参数提取方法

黄鹤^{1,2},肖飞¹,杨国润¹,麦志勤¹

(1. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033;

2. 中国船舶集团第七一一研究所,上海 201108)

摘要:准确提取参数对超级电容储能系统安全、可靠、高效运行具有重要意义。为克服测试系统复杂、有效数据点少、在线提取困难等问题,提出一种通过补偿内阻消除平衡充放电滞回差异的超级电容参数提取方法。该方法充分利用超级电容在充放电过程中由内阻压降引起的容值-端电压曲线不重合的物理特性,从充放电过程的所有数据中准确提取参数,可有效排除动态过程对参数提取精度的影响。理论分析与实验研究表明所提方法能在不同温度与电流条件下准确提取超级电容的等效参数,可为系统性能测试、优化控制以及高效运维提供有效支撑。

关键词:超级电容;参数提取;滞回特性;充放电过程

中图分类号:TM 53

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202203008

0 引言

超级电容是一种新型的电能存储装置,具有功率密度大、充放电效率高、循环寿命长、使用温度范围宽、环保等优点^[1]。将大功率密度的超级电容与高能量密度的储能元件(如蓄电池、燃料电池)构成混合储能系统可互补利用不同元件的性能优势,广泛应用于电动汽车、船舶电力推进、制动能量回收和新能源发电等场合^[2-11]。

超级电容在工作过程中存在可逆的电解液极化过程,其电阻与电容参数受电压、温度、电流等多种因素影响而并非常数。参数变化可能引起充放电效率下降及发热增加,降低能量利用效率及缩短使用寿命。实际工程中,准确提取超级电容等效参数并研究其特性,对系统优化设计以及安全、可靠、高效运行具有重要意义^[12-19]。

国内外学者针对超级电容参数提取方法开展过大量研究,现有方法主要集中在阻抗谱法^[14]和暂态压降法^[15-16]。其中阻抗谱法属于一种离线频域测试的方法,它采用一套专用设备在离线条件下对超级电容注入不同频率的谐波并得到一定频段范围内的阻抗参数。该方法可获得超级电容的阻抗谱并建立系统高阶详细模型,但测试设备十分昂贵。暂态压降法是目前IEC与国家标准规定的超级电容内阻测试方法。该方法利用平衡充放电切换暂态过程中电容电压的变化量 ΔU_{sc} 与电流 I_{sc} 之比测量电容内阻 R_{eq} ,即 $R_{eq}=\Delta U_{sc}/I_{sc}$ 。然而由于充放电切换暂态过程很短且内阻压降很小,该方法对测量动态性能及精

度要求很高。此外,暂态电压降需根据预设计算起始电压与计算结束电压通过线性反推获取,这对测量设备的精度要求很高。

为克服现有技术的困难,本文从物理特性的角度出发提出一种基于充放电滞回特性的超级电容参数提取方法。该方法可通过超级电容储能系统平衡充放电测试来获取电容器参数信息,其中平衡充放电是指采用相同大小的电流对超级电容进行充放电的一种测试方式。理论上而言,在忽略充放电电流切换引起电压暂降的准稳态条件下超级电容在每次平衡充放电过程中的等效电容 C_{eq} 与其电压 U_c 特性(即 $C_{eq}=f(U_c)$)应保持一致。但实际系统中,由于内阻压降会引起超级电容容值估算偏差,导致充放电过程中电容-端电压曲线出现滞回现象。基于该物理特性,通过补偿内阻压降来消除滞回特性有望准确获取电容器内阻与电容参数。为验证所提方法的可行性与有效性,开展了实验研究工作,结果表明滞回特性法可准确提取不同工况下的电容等效参数。不同于传统暂态压降法仅利用充放电切换前后个别暂态数据点计算内阻参数,本文提出的方法充分利用超级电容充放电过程中的所有数据,并通过消除滞回特性的方式估算电容参数,从原理上可有效避免动态过程及非线性特性对参数提取精度的影响。作为一种准在线测试技术^[19],该方法具有安全、简便、准确等优点,可为系统性能测试、优化控制及高效运维提供支撑。

1 超级电容充放电滞回特性及产生机理

典型的超级电容等效模型如图1所示,图中 U_{sc} 为超级电容端电压。

容-压特性是由超级电容电解液电荷扩散效应引起一种物理特性。文献[20]推导了双电层超级电

收稿日期:2021-05-18;修回日期:2022-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907199)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907199)

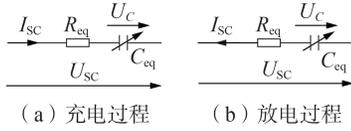


图1 超级电容简化等效模型

Fig.1 Simplified equivalent model of supercapacitor

容的容-压特性,如式(1)所示,若忽略电解液离子尺寸 γ (即 $\gamma=0$),式(1)与Gouy-Chapman电容关系一致,如式(2)所示。

$$\begin{cases} C = C_0 \frac{\cosh \frac{u}{2}}{1 + 2\gamma \sinh^2 \frac{u}{2}} \sqrt{\frac{2\gamma \sinh^2 \frac{u}{2}}{\ln \left(1 + 2\gamma \sinh^2 \frac{u}{2} \right)}} \\ C_0 = \frac{\varepsilon}{4\pi L_D}, L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon K_B T}{4\pi e^2 N}} \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{\gamma=0} \rightarrow C_{GC} = C_0 \cosh \frac{u}{2} \quad (2)$$

式中: C 为容值; C_0 为线性Gouy-Chapman电容; u 为电压; ε 为电解液中值介电常数; L_D 为表征离子作用尺寸的德拜长度; T 为绝对温度; e 为电子电荷; N 为电子密度; K_B 为波尔兹曼常数; C_{GC} 为Gouy-Chapman电容。

分析理论模型可知,超级电容运行过程中,随着电压增加,电解液中电荷扩散分布梯度逐渐减小(即双电层间距离减小)而容值增大。与理想模型不同,实际超级电容存在内阻压降,端电压与等效电容压降并不完全相等。超级电容充放电过程中内阻压降极性不同,会出现等效电容-端电压特性(即 $C_{eq} = f(U_{SC})$)曲线无法重合的滞回现象。典型超级电容充放电过程中的容-压滞回特性曲线见附录A图A1。

在90 A / 25 °C条件下对2.7 V / 3000 F超级电容进行充放电测试(实验系统详见4.1节),测得的电容器端电压与电流波形如附录A图A1(a)所示。若不能准确补偿电容内阻就会引起等效电容电压与容值的估算偏差,形成充放电过程中的容-压曲线滞回偏差,据此特性可利用测量得到的端电压与电流估算超级电容参数。如图A1(b)中蓝色曲线所示,若忽略电容内阻则会引起充电过程中电容电压偏大而容值偏小,而放电过程则相反,从而形成容-压滞回特性;如图A1(b)中红色曲线所示,准确补偿内阻后可在准稳态条件下有效消除容-压滞回现象。

2 基于滞回特性的超级电容参数提取法

根据超级电容充放电过程中存在的容-压滞回物理特性,本文提出一种准确提取超级电容等效内阻与容值参数的方法,基本原理如图2所示。

由图2可知,在平衡充放电过程中,超级电容中

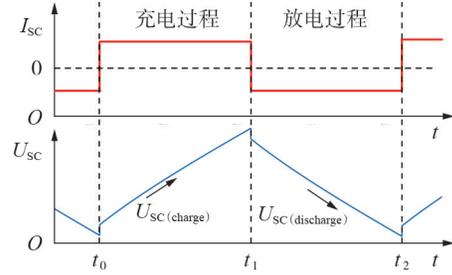


图2 基于充放电滞回特性的超级电容参数提取的基本原理

Fig.2 Principle of parameters extraction of supercapacitor based on charging and discharging hysteresis characteristics

电阻压降的极性随电流极性交替变化,即充电过程中压降为正而放电过程中压降为负,从而产生滞回特性。根据超级电容等效电路可推导充电和放电过程中超级电容的端电压表达式分别为:

$$\begin{cases} U_{SC(\text{charge})}(t) = I_{SC} R_{eq} + \frac{\int_{t_0}^t I_{SC} dt}{C_{eq(\text{charge})}} + U_{SC0} \\ U_{SC(\text{discharge})}(t) = -I_{SC} R_{eq} - \frac{\int_{t_1}^t I_{SC} dt}{C_{eq(\text{discharge})}} + U_{SC0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{SC0} 为充放电初始时刻超级电容的电压; $U_{SC(\text{charge})}(t)$ 、 $U_{SC(\text{discharge})}(t)$ 分别为充电和放电过程中超级电容的端电压; $C_{eq(\text{charge})}$ 、 $C_{eq(\text{discharge})}$ 分别为充电和放电过程中超级电容的等效电容。

根据平衡充放电可逆性,充放电过程中电容器等效电容相等,即 $C_{eq(\text{charge})} = C_{eq(\text{discharge})} = C_{eq}$,因此有:

$$\frac{\int_{t_0}^{t_1} I_{SC} dt}{U_{SC(\text{charge})}(t) - I_{SC} R_{eq} - U_{SC0}} = \frac{-\int_{t_1}^{t_2} I_{SC} dt}{U_{SC(\text{discharge})}(t) + I_{SC} R_{eq} - U_{SC0}}$$

进一步可得:

$$R_{eq} = \frac{U_{SC(\text{charge})}(t) - U_{SC(\text{discharge})}(t)}{2I_{SC}} = \frac{\Delta U_{SC}}{2I_{SC}} \quad (4)$$

由式(4)可知,利用平衡充放电过程中电容器端电压的滞回特性可计算电阻参数。实际系统中,考虑到超级电容多孔结构引起的电荷分布动态效应及电容的电压特性,等效电阻和电容是频率 f 或电压 U_c 的函数,即 $R_{eq}(f)$ 、 $C_{eq}(f, U_c)$ 。为避免非常系数及非线性特性对超级电容参数提取的影响,采用如附录A图A2所示的基于前馈补偿的超级电容参数提取方法,其中等值电容电压估计值 $U_{C_{est}}$ 与等值电容估计值 $C_{eq_{est}}$ 的计算公式分别为:

$$U_{C_{est}} = U_{SC} - I_{SC} R_{eq_{est}} \quad (5)$$

$$C_{eq_{est}} = \frac{\int I_{SC} dt}{U_{C_{est}}} + C_{eq0} \quad (6)$$

式中: $R_{eq_{est}}$ 为电阻估计值; C_{eq0} 为初始电容值。

首先,对模型进行初始化,输入电容温度 T_{sc} 与

初始电容值 C_{eq0} ;接着,根据电流极性计算电容充电或放电过程的容-压曲线并在准稳条件下计算滞回偏差 E_{cv} ;然后,以消除滞回偏差为目标通过迭代方式对超级电容内阻参数进行补偿求得满足一定精度要求的电容内阻参数;最后,代入电容内阻参数求得准稳态条件下容-压特性。

实际系统中温度及电容老化等因素可能导致容-压特性变化,但考虑到在一个或几个充放电周期的较短时间内电容器参数基本保持不变,因此滞回特性法可有效跟踪状态变化,准确提取电容器参数。尽管滞回特性法提取的是超级电容简化等效RC参数,但从储能系统宏观来看,任何复杂的超级电容模型都可简化等效为随运行条件变化的RC电路,因此该方法可为超级电容储能系统性能测试、优化控制以及高效运维提供有效支撑。

3 实验验证

本文开展了一系列实验以验证基于充放电滞回特性的超级电容参数提取方法的可行性与有效性。

3.1 超级电容测试系统

本文选用奥威 2.7 V / 3 000 F 超级电容单体进行充放电测试,被测超级电容基本数据如附录 B 表 B1 所示。超级电容测试实验平台如附录 B 图 B1 所示,通过软件编程可对超级电容进行多种充放电操作,包括恒压充放电、恒流充放电、恒功率充放电和基于仿真电流数据进行循环充放电等。测试平台有 CH1、CH2 这 2 个测试通道,电压范围为 0~5 V,电流范围为 0~500 A。此外,测试平台可以进行温升实验,温度测试通道共 8 个,通过温度传感器能采集单体的表面温度和两极温度。超级电容测试系统主要参数如附录 B 表 B2 所示。

3.2 不同温度条件下充放电测试

在不同温度条件下对奥威 3 000 F 超级电容进行 90 A 平衡充放电测试。利用滞回特性法对实验数据进行了处理,测得的超级电容内阻与容-压特性如图 3 所示。

为对比验证滞回特性法的正确性,本文同时采用频域法^[21]提取了超级电容阻抗谱,实验结果如附录 B 图 B2 所示。频域法测量超级电容阻抗谱的基本原理是对循环充放电的超级电容端电压 U_{sc} 与电流 I_{sc} 信号进行快速傅里叶变换(FFT)分析,然后计算不同频率下电容的等效阻抗,即 $Z_{eq}(f) = f_{FFT}(U_{sc})/f_{FFT}(I_{sc})$,其中函数 f_{FFT} 表示对数据进行 FFT 以得到不同频率下的幅值,进而得到一定频段内的超级电容阻抗谱。频域法测得的阻抗谱下限频率由循环充放电周期决定,上限频率则主要受电压信号高频测量误差限制。以图 B2 所示的 90 A 充放电测试结果为例,181 s 充放电周期对应的阻抗谱下

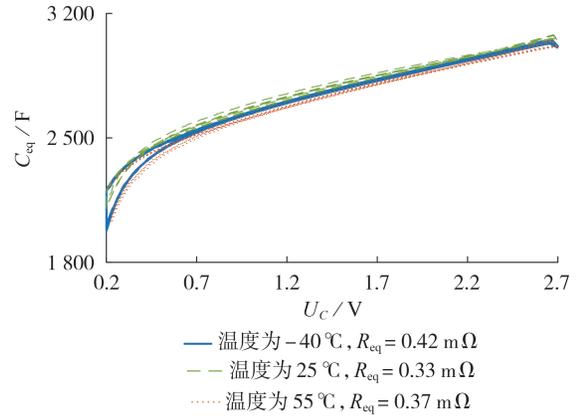


图3 不同温度下超级电容参数提取实验结果(滞回特性法)

Fig.3 Experimental results of supercapacitor parameter extraction under different temperatures with hysteresis characteristics method

限频率为 5.5 mHz,上限频率为 5 Hz。阻抗谱可有效反映超级电容参数情况,其中低频段横、纵坐标分别近似等于超级电容内阻与等效电容,阻抗谱随频率变化趋势则反映出超级电容充放电过程中因多孔结构引起电荷再分布的动态特性。

不同温度条件下分别利用滞回特性法与频域法提取得到的超级电容内阻与容值的结果如表 1 所示,通过对比可得如下结论。

1)利用滞回特性法提取的电容内阻与频域法结果基本一致,验证了滞回特性法的可行性与有效性。温度对超级电容内阻有一定影响,特别当温度下降到-40 °C时电解液粘度增加导致内阻增大,实验结果与理论分析一致。

2)不同温度下超级电容容值存在一定差异,滞回特性法与频域法结果的偏差量一致(约 30 F)。在中高温区,提取得到的内阻随温度先减小后增大,其原因可能与该超级电容在中高温区的工作特性有关。实际系统中超级电容参数在中高温区的温度特性受具体结构、规格、材料等因素影响而呈现一定分散性^[19]。

表1 滞回特性法与频域法提取的超级电容参数对比

Table 1 Comparison of extracted supercapacitor parameters between hysteresis characteristics method and frequency domain method

运行条件	滞回特性法		频域法	
	$R_{eq}/m\Omega$	C_{eq}/F	$R_{eq}/m\Omega$	C_{eq}/F
$I_{sc}=90\text{ A}$, 温度为-40 °C	0.420	3 021	0.406	3 104
$I_{sc}=90\text{ A}$, 温度为-25 °C	0.330	3 050	0.313	3 121

在精度方面,实际系统中滞回特性法应优于频域法。一方面,频域法的下限频率受循环充放电周期限制,在该频率下提取的超级电容等效参数与直流条件下的理论值不可避免地存在一定误差;另一

方面,频域法需要对电压、电流数据进行FFT处理,其精度易受信号平稳性、时间窗口周期性及采样率等因素影响。

3.3 不同电流条件下充放电测试

本文在室温环境(25℃)开展了不同电流条件下的平衡充放电测试并利用滞回特性法提取了超级电容内阻,结果如表2所示,可以发现超级电容内阻随着充放电电流的增加而减小。随着电流增加,超级电容充放电过程中带电离子游移进入多孔结构与电子电荷形成双电层电容的过程加快,内阻减小。理论分析验证了实验结果的正确性。实际系统中,准确获取不同电流条件下超级电容内阻可为优化系统充放电策略提供依据。

表2 不同电流下利用滞回特性法提取的超级电容内阻(25℃)

Table 2 Extracted resistances of supercapacitor under different currents with hysteresis characteristics method(25℃)

I_{SC} / A	$R_{eq} / m\Omega$	I_{SC} / A	$R_{eq} / m\Omega$
70	0.3465	280	0.3124
140	0.3294	350	0.2840
210	0.3238		

3.4 动态充放电测试

为进一步验证滞回特性法的有效性,在25℃条件下对奥威3000F超级电容开展了动态充放电测试,实验结果如附录B图B3所示。由图B3(a)可知,动态充放电前电容初始电压为 $U_{sc0}=2.35V$,根据历史数据得到的容-压曲线可以确定初始电容为 $C_{eq0}=2950F$ 。在此基础上采用附录A图A2所示方法可以估算出不同充放电电流条件下电容器等效内阻和容-压特性。图B3(b)中蓝色曲线是90A时滞回特性补偿后测得的容-压特性,红色曲线是350A时滞回特性补偿后测得的容-压特性。进一步分析可知:电流为90A时,内阻估算结果与图3所示恒流充放电时结果一致;电流为350A时,受充放电频率等因素影响,内阻下降。实际系统中,开展动态充放电测试可有效提高不同工况下超级电容等效参数提取的效率。

4 结论

本文在研究超级电容充放电特性的基础上重点分析了容-压特性滞回现象,并根据该原理提出一种超级电容参数提取新方法。超级电容充放电过程中容-压滞回特性产生的根本原因是充放电电流产生的电容器内阻压降极性相反,据此可准确获取电容器参数信息。不同温度、电流以及动态充放电实验结果验证了该方法的可行性与有效性。

与传统方法相比,基于滞回特性的超级电容参

数提取方法充分利用充放电过程中所有测试数据,可有效排除超级电容非线性特性影响并提高检测精度,适用于超级电容储能系统的性能测试、优化控制、高效运维等不同场合。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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 electro chemical supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(3):188-195.
- [2] ASHTIANI C, WRIGHT R, HUNT G. Ultracapacitors for automotive applications[J]. Journal of Power Sources,2006,154(2):561-566.
- [3] BRENNAN M, FOIADELLI F, TIRONI E, et al. Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems [C]//Proceedings of the 2007 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy:IEEE,2007:69-73.
- [4] RUFER A, HOTELLIER D, BARRADE P A. Supercapacitor based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(2):629-636.
- [5] 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,2010,25(3):117-123.
XU Aiguo, XIE Shaojun, YAO Yuan, et al. Regenerating energy storage system based on ultra-capacitor for urban railway vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(3):117-123.
- [6] 蔡国伟,陈冲,孔令国,等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(17):84-94.
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17):84-94.
- [7] 毕恺韬,安群涛,段建东,等. 基于级联多电平直流变换器的超级电容储能系统能量自均衡控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(8):1919-1928.
BI Kaitao, AN Quntao, DUAN Jiandong, et al. Self balancing control strategy for super capacitor energy storage system based on cascaded multilevel DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(8):1919-1928.
- [8] 李轩,李永丽,常晓勇. 基于精确线性化理论的超级电容储能系统的非线性控制算法[J]. 电工技术学报,2016,31(21):12-20.
LI Xuan, LI Yongli, CHANG Xiaoyong. Nonlinear control algorithm for super capacitor energy storage system based on exact linearization theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(21):12-20.
- [9] 顾帅,韦莉,张逸成,等. 超级电容器老化特征与寿命测试研究展望[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):145-153.
GU Shuai, WEI Li, ZHANG Yicheng, et al. Prospects of ageing characteristic and life test research on super capacitors[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):145-153.
- [10] 杨洪明,陈博文,王懂,等. 局部阴影遮挡下太阳能电池-超级电容器阵列建模及其缺失电流协同补偿方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):15-23.
YANG Hongming, CHEN Bowen, WANG Dong, et al. Modeling of solar cell-ultracapacitor array under local shadow occlusion

- and collaborative compensation method for missing current [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(6): 15-23.
- [11] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(3): 100-104, 128.
CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for smoothing power fluctuation in hybrid energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- [12] 信月, 杨中平, 林飞, 等. 基于参数反馈的城轨交通超级电容健康状态估算[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(增刊1): 396-404.
XIN Yue, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Research on state of health estimation of supercapacitor in urban rail transit based on parameter feedback[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(Supplement 1): 396-404.
- [13] MEJDOUBI A E, CHAOUI H, GUALOUS H, et al. Online parameter identification for supercapacitor state-of-health diagnosis for vehicular applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(12): 9355-9363.
- [14] 张雷. 电动车辆用超级电容建模与状态估计算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHANG Lei. Research on modeling and state estimation algorithm of supercapacitor for electric vehicle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [15] IEC. Electric double-layer capacitors for use in hybrid electric vehicles-test methods for electrical characteristics: IEC 62576-2009[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 超级电容器 第1部分: 总则: GB/T 34870.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] 陈谦, 陈霄逸, 金宇清, 等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(4): 70-76.
CHEN Qian, CHEN Xiaoyi, JIN Yuqing, et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(4): 70-76.
- [18] 刘成印, 李强, 薛安忠, 等. 超级电容直流操作电源[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(11): 115-117.
LIU Chengyin, LI Qiang, XUE Anzhong, et al. DC operation power supply with supercapacitor[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(11): 115-117.
- [19] LI H, XIANG D, HAN X, et al. High-accuracy capacitance monitoring of DC-link capacitor in VSI systems by LC resonance[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(12): 12200-12211.
- [20] KORNYSHEV A A. Double-layer in ionic liquids: paradigm change[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111: 5545-5557.
- [21] 陈书礼, 韩金磊, 荣常如, 等. 温度和电压对超级电容器单体内阻影响的研究[J]. *汽车技术*, 2016, 486(3): 40-44.
CHEN Shuli, HAN Jinlei, RONG Changru, et al. Influence of temperature and voltage on internal resistance of supercapacitor[J]. *Automotive Technology*, 2016, 486(3): 40-44.

作者简介:



黄 鹤

黄 鹤(1976—), 男, 湖北十堰人, 研究员, 博士研究生, 主要研究方向为电力电子及电气传动(E-mail: 13917228731@139.com);

肖 飞(1977—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力电子及电气传动(E-mail: xfeyninger@gmail.com)。

(编辑 李莉)

Parameter extraction of supercapacitor based on charging and discharging hysteresis characteristics

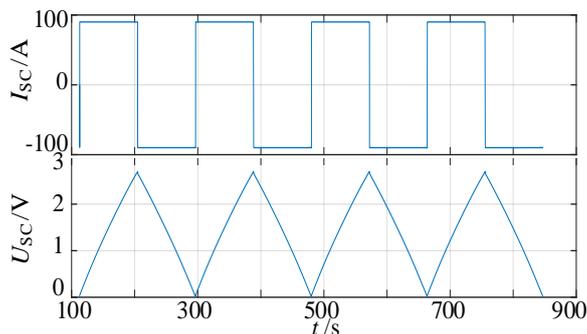
HUANG He^{1,2}, XIAO Fei¹, YANG Guorun¹, MAI Zhiqin¹

- (1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

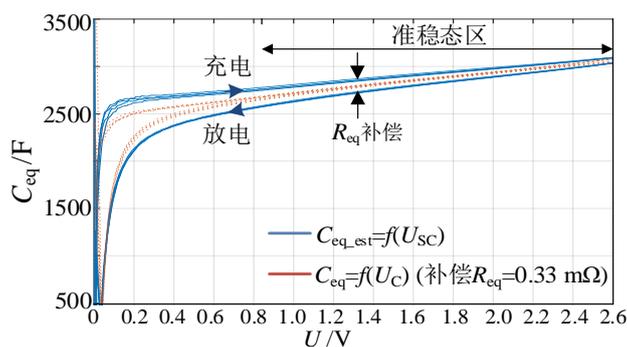
Abstract: Parameter extraction is important for the safe, reliable and efficient operation of supercapacitor energy storage system. In order to overcome the problems such as complexity, few effective data and difficult online extraction, a parameter extraction method of supercapacitor is proposed by compensating the internal resistance to eliminate the hysteresis difference during balanced charging and discharging process. The method fully uses the physical characteristics that the curves of supercapacitor capacitance vs. terminal voltage are not coincident due to the internal resistance voltage drop during the charging and discharging process, so as to accurately extract the parameters from all the data in charging and discharging process, which can effectively eliminate the influence of dynamic process on parameter extraction accuracy. Theoretical analysis and experimental study show that the proposed method can extract the equivalent parameters of supercapacitor under the conditions of different temperatures and currents, providing the effective support for system performance test, optimal control, and efficient operation and maintenance.

Key words: supercapacitor; parameter extraction; hysteresis characteristics; charging and discharging process

附录 A



(a) 恒流充放电测试 (充放电电流 90 A, 25 °C)



(b) 容-压特性

图 A1 超级电容充放电滞回特性

Fig.A1 Charging and discharging hysteresis characteristics of supercapacitor

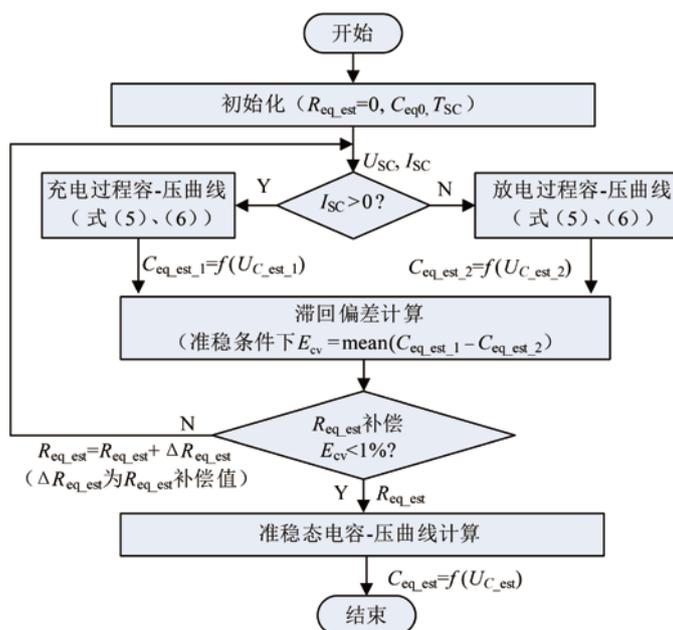


图 A2 基于滞回特性的超级电容参数提取方法

Fig.A2 Parameters extraction method of supercapacitor based on charging and discharging hysteresis characteristics

附录 B

表 B1 被测超级电容基本数据

Table B1 Basic data of tested supercapacitor

参数	数值
型号	UCR27V3000B
标称容量/F	3 000
工作电压/V	2.7
最大充放电电流/A	2 200
直流内阻/mΩ	0.25
工作温度/°C	-40~55



图 B1 超级电容测试系统实验平台

Fig.B1 Experimental platform of supercapacitor test system

表 B2 超级电容测试系统主要参数

Table B2 Basic data of supercapacitor test system

参数	数值
型号	Arbin 5V500A
充/放电电流/A	-500~500
充/放电电压/V	0~5

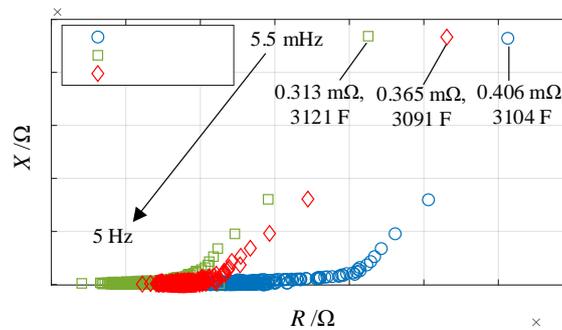
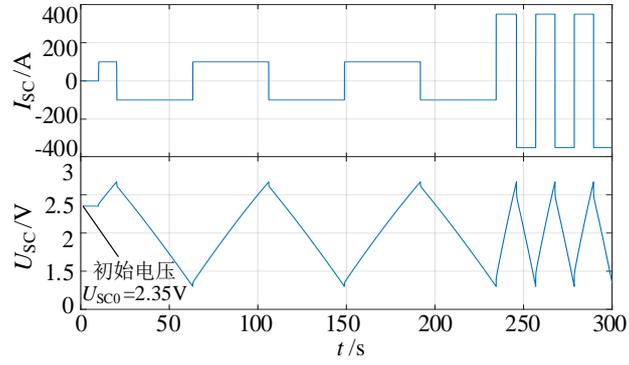
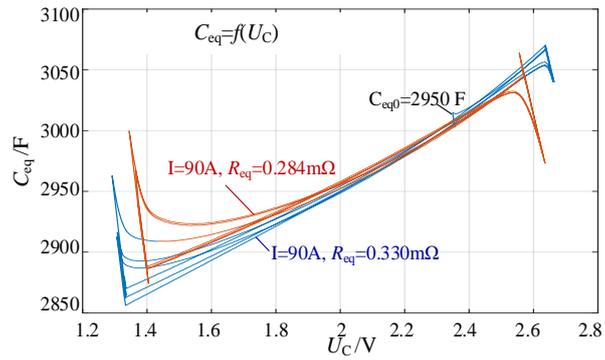


图 B2 不同温度下超级电容参数提取实验结果（频域法）

Fig.B2 Experimental results of supercapacitor parameter extraction under different temperatures with frequency domain method



(a) 动态充放电测试



(b) 容-压特性

图 B3 动态充放电条件下超级电容参数提取实验结果 (25 °C)

Fig.B3 Experimental results of supercapacitor parameter extraction under dynamic charging and discharging condition(25 °C)