

# 超级电容器充放电特性研究

王贤泉<sup>1</sup> 郑中华<sup>2</sup>

(1. 海军驻武汉七一二所军事代表室, 武汉 430064; 2. 中国船舶重工集团公司七一二研究所, 武汉 430064)

**摘要:** 通过不同充电电流对容量的影响分析, 发现超级电容器放电容量受充电电流影响显著, 充电电流越大, 储能越小。在充电制度中加入恒压充电步骤, 既能改善大电流充电时的放电容量, 又能提高各单体间的一致性。此外通过单体工艺与结构优化, 可降低超级电容器单体内阻, 减小大电流放电电压降, 提高了单体的大电流放电功率特性。

**关键词:** 超级电容器 功率特性 充放电特性

中图分类号: TM53

文献标识码: A

文章编号: 1003-4862(2011)04-0055-03

## Research On Charging/Discharging Behavior of Supercapacitors

Wang Xianquan<sup>1</sup>, Zheng Zhonghua<sup>2</sup>

(1. Naval Representative Office of 712 Research Institute, Wuhan 430064, China;

2. Wuhan Institute of Marine Electric Propulsions, CSIC, Wuhan 430064, China )

**Abstract:** According to the analysis of different charging current, the discharging capacity of supercapacitor is significantly affected by charging current, and the energy storage is smaller when the charging current is larger. It is possible not only to improve the discharging capacity during high rate discharge, but also enhance the coherence of different monomer. Through the technology and structure optimization of individual supercapacitor, the inner resistance and the voltage drop during high rate discharge of individual supercapacitor is reduced, and the power performance during high rate discharge is improved.

**Key words:** super-capacitor; power performance; charging/discharging characteristic;

### 1 引言

超级电容器因具有能量转换效率高、质量轻、电流密度高、启动速度快、工作温度范围宽和环境友好等特点, 能有效补充常规动力电池在高功率输出、快速充电、充放电循环寿命等性能方面的不足, 在电动 / 混合动力车辆、移动储能器件和 UPS 等方面的应用成为一种趋势<sup>[1-2]</sup>。超级电容器的储能原理不同于常规动力蓄电池, 其充放电过程的容量状态有其自身的特点, 受充放电电流、温度、充放电循环次数等因素的影响, 其中充放电电流是最主要的影响因素<sup>[3]</sup>。

笔者通过 12 V/60 F 超级电容器充放电特性试

验, 确定了超级电容器电能容量与充电电流的关系, 探讨超级电容器的放电能力与充电方式间的关系, 为超级电容器充放电参数的选择和充放电方法的研究提供依据。

### 2 超级电容器储能容量状态计算方法

超级电容器的能量存储在多孔材料“电栅溶液”界面的双电层和电极内部, 所存能量  $E$  是电容  $C$  和内阻  $R$  的函数<sup>[4]</sup>。若采用恒流充电, 电容  $C$  不随超级电容器的端电压变化, 则最大储能密度可表示为:

$$E_{\max} = C_e U_R^2 / (2m)$$

其中,  $U_R$  为额定电压 (V),  $m$  为电容器质量 (kg),  $C_e$  为额定容量 (F)。

而额定容量是根据恒流放电方法测试得出, 计算公式如下:

收稿日期: 2010-11-22

作者简介: 王贤泉(1970-), 男, 工程师。研究方向: 动力蓄电池。

$$C_e = I_e \times (t_1 - t_2) / (U_1 - U_2), \quad U_1 = 0.8 U_R, \quad U_2 = 0.2 U_R$$

其中  $C_e$  为额定容量 (F);  $I_e$  为额定容量测量时对应的放电电流 (A);  $U_1$  为测量的初始电压 (V);  $U_2$  为测量的终止电压 (V);  $t_1$  为放电初始到电压达到  $U_1$  的时间 (s);  $t_2$  为放电初始到电压达到  $U_2$  的时间 (s)。

### 3 充电制度对放电容量的影响

12 V/60 F 超级电容器能够进行快速充电, 以下分别以 25 A、50 A 电流对 12 V/60 F 样机进行充电测试, 试验结果见图 1。

由图 1 可知, 大电流充电虽能减少充电时间, 但是放电压降也随之增大, 放电实际容量会随之降低, 这充分说明超级电容器双电层的形成过程是需要时间来建立电势平衡的。

为了进一步提高超级电容器的快速充电特性, 在 50 A 充电至截止电压后进行了 10 s 恒压, 充电特征曲线见图 2。

由图 2 可知, 充电制度中加入恒压步骤, 能够在很大程度上稳定电容器的双电层平衡电势, 有利于双电层的稳定形成。

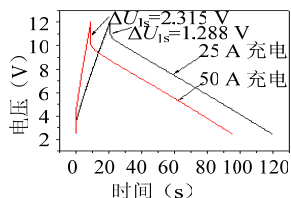


图 1 超级电容器 25 A、50 A 充电特征曲线

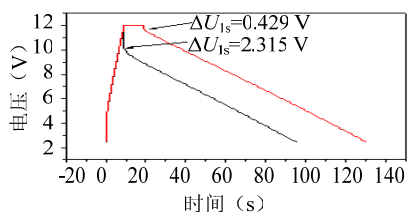


图 2 超级电容器 50 A 恒压充电特征曲线

### 4 充电制度对样机单体一致性的影响

12 V/60 F 超级电容器要求其单体间具有很小的差异性, 即在充放电过程中单体的放电曲线具有很好的一致性。以下对试验样机进行 50 A 恒流充电、5 A 恒流放电测试。在进行充放电过程中, 存在不均匀性, 会导致电容器容量的降低, 如果不及时恢复落后的单体状态, 则会在随后的循环过程中, 导致落后单体工况进一步恶化, 最终使得样机容量衰减。

为了解决单体放电不一致问题, 在 50 A 充电至截止电压后增加 10 s 恒压步骤。样机 50 A 充电至截止电压 12 V 后增加 10 s 的恒压, 能够显著改善单体间的差异, 尤其对落后单体的作用是巨大的。由此可见, 样机大电流充电过程中, 单体间的差异造成的电压不一致性, 可以通过恒压很好的解决。

### 5 超级电容器单体功率特性优化

理论上讲, 电容器单体由一定数量的单电极内部并联而成, 电容器单体的电流输出将在单电极上均匀分配。因此如果能够减小单电极的活性物质的厚度, 增加单电极的数量, 能有效的降低电容器单体的内阻, 从一定程度上可以提高电容器单体的功率输出特性。试验研究发现, 通过减薄极片涂布厚度, 增大压实密度等方法对单电极进行合理的优化设计, 在极群组装中增加装配松紧度, 可有效的降低超级电容器单体的直流内阻, 提高功率输出特性。

为了进一步测试电容器单体的功率特性, 通过极片工艺与总结构的优化设计, 分别对 2.4 V/300 F 与 2.4 V/500 F 超级电容器单体进行了 50 A 充放电测试, 测试特征曲线见图 3、图 4。由图可知, 超级电容器的充放电电压随时间成线性变化, 这符合超级电容器的充放电特征。2.4 V/500 F 电容器单体 50 A 放电, 相比 2.4 V/300 F 电容器单体, 电压降由 0.346 V 减小到 0.176 V。由此可见通过电极与结构的优化设计, 可以极大改善电容器单体的大电流放电特性。

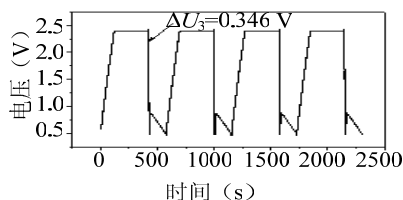


图 3 2.4 V/300 F 单体 50 A 充放特征曲线

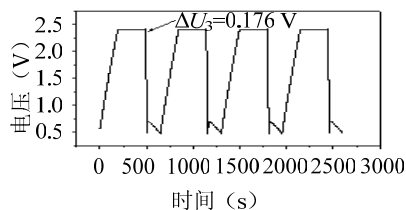


图 4 2.4 V/500 F 单体 50 A 充放特征曲线

(下转第 54 页)

电机并机带水电阻进行带载测试,观测两台发电机并机带载时负载分配的均衡性。在两台发电机并机带载正常后,模拟发电机和市电反并网控制系统功能,将一台发电机启动模拟电网,另一台发电机带水电阻负载,观测两台发电机之间负载转移和固定功率输出的正确性。将两台发电机由并车控制器启动,由 5560 控制器控制两台发电机和汽轮机电网进行正并网,观测发电机是否按设定的功率和功率因素输出。在以上调试完成后,进行实际黑启动试验,由电厂集控台发启动指令,并车控制器自动启动机组,自动分合高压开关柜,自动带负载,实际运行中,整个黑启动历时 9 小时,汽轮机发电机从静止到发电,一次启动成功。高压柴油发电机组在多台高压电机启动时,能保证频率、电压跌落在标准范围内,两台发电机有功、无功分配均衡,整个控制系统画面清晰,控制稳定可靠,完全达到实现电厂黑启动的要求。

~~~~~

(上接第 50 页)

#### 参考文献:

- [1] 韩冰. 舰船航行参数辨识的方法研究与实现[D]. 武汉:海军工程大学, 2008.
- [2] 辛元欧, 俞胜芬. 关于 K—T 方程类的辨识方法研究——自回归模型的辨识[J]. 中国航海, 1983, 13(2): 28-43.

~~~~~

(上接第 56 页)

#### 5 结束语

通过超级电容器单体工艺与结构优化,可降低单体内阻,减小了大电流放电压降,提高了单体的大电流放电功率特性。由于储能过程需要时间建立电势平衡,超级电容器的放电容量受充电电流显著影响,充电电流越大,储能越小,而在充电制度中增加小段恒压时间,则可很大程度提高电容器储能特性。此外加入恒压过程可减少 12 V/60 F 超级电容器中单体的功率输出差异,有利于超级电容器的整体性能稳定输出。

#### 参考文献:

- [1] Portet C, Taberna P L, Simon P, et al. High power density electrodes for carbon supercapacitor

#### 6 结束语

由于环境限制和成本考虑,单个独立供电的发电厂在逐渐增加,用高压柴油发电机组作为电厂黑启动的需求也随之增加。文中对黑启动整体结构、控制系统、调试方法及试验结果的描述,希望对其他类似电厂的黑启动有一定参考作用。

#### 参考文献:

- [1] 许珉主编. 发电厂电气主系统. 北京:机械工业出版社, 2006.1.
- [2] 佟纯厚主编. 近代交流调速. 北京:冶金工业出版社 2004.9
- [3] 英国深海公司. DSE Model 5110 Control and Instrumentation System Operators Manual.
- [4] 欧姆龙公司. SYSMAC CP 系列操作手册.
- [5] 赖广显主编. 新型柴油发电机组. 北京:人民邮电出版社. 1999.

- [3] 李言俊, 张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2003, 50-76.
- [4] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002: 73—74.
- [5] 李铁三, 杨盐生, 郑云峰. 不完全驱动船舶非线性控制[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3 (4): 39—43.

applications[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50: 4174-4181.

- [2] Conway B E, Peil W G. Power limitations of supercapacitor operation associated with resistance and capacitance distribution in porous electrode devices[J]. J Power Sources, 2002, 105(1): 169-181.
- [3] 李忠学, 彭启立, 陈杰. 超级电容器端电压动态特征的研究[J]. 电池, 2005, 35(2): 85-86.
- [4] Niu J J, Pell W G, Conway B E. Requirements for performance characterization of C double-layer supercapacitors: applications to a high specific-area C-cloth material[J]. Journal of Power Sources, 2006, 156: 725-740.