

[控制系统]

储能电容恒流充电试验平台与性能分析

文/北京航天试验技术研究所 尚凯伦 杜 鹏

针对储能电容的工作原理，提出了一种充电性能测试的方法，验证了试验仿真所用的储能电容等效模型的可参考性。使用数字式线性直流稳压电源MOTEC LPS-305提供测试的恒定电流，并用Tektronix TDS1002示波器显示结果。设计以BUCK电路为基础的恒流充电。通过对储能电容施加不同等级的充电电流，测试和分析其容量特性与内阻特性。

储能电容作为一种新型的绿色储能元件，由于其不可替代的优良特性，对其的研究和认识越来越深刻。储能电容具有使用寿命长、环境良好、功率密度高和充电速度快等优点，而且在短时间内可以瞬时释放能量、高低温性能好，所以在能量供应方面的优越性得到越来越多国家、军事部门及工业界的重视。经过多年的发展，现在在混合动力车、武器及不间断电源等领域具有潜在的广泛应用前景。

储能电容的等效模型及验证

根据构造的不同，储能电容分为两类：双电层电容与法拉第准电容。前者在外加电压的作用下，一层电荷在电极上，另一层电荷在溶液里，所以称之为双电层，整个过程是简单的物理储能。后者在充放电过程中，电极表面发生电沉积或氧化还原反应，这是电化学变化过程，所以被成为电化学电容。在相同电极面积下，法拉第准电容可以是双电层电容量的10~100倍。现在广泛认可的储能电容模型如图1所示，在大部分测试中，可以忽略 R_{EP} 的影响。

图中， R_{ES} 表示等效串联电阻，它会降低储能电容实际可用的有效储能率，值较小； R_{EP} 表示等效并联电阻，它会产生静态漏电流，在储能电容

处于静止储能状态时会造成电能的损失，其值较大； C 表示储能电容的电容量。

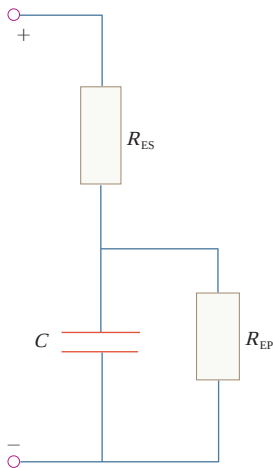


图1 储能电容典型模型

模型验证

仿真采用的储能电容的参数参照KAMCAPHP-2R7-J335TY LL的规格，如下表所示。

表 储能电容规格参数

$C_R/F(V_R/V)$	$R_{ES}/m\Omega$	$R_{ES} \cdot C_R/(m\Omega \cdot F)$	$I_{leakage}/\mu A$
凯美 3.3 (2.7)	250	835	400

储能电容恒流充电稳态工况的仿真结果及试验结果如图2、图3所示。

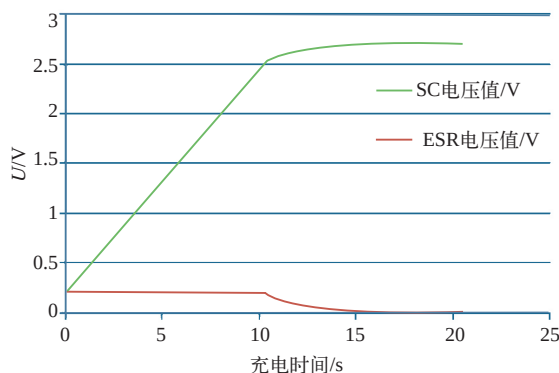


图2 储能电容恒流充电稳态工况仿真结果

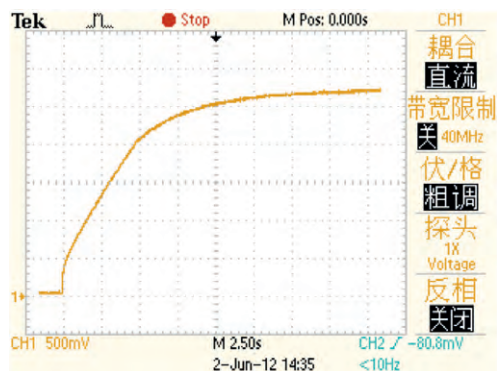


图3 储能电容恒流充电稳态工况试验结果

由仿真结果与试验结果可知，本文选用的储能电容等效模型是可用的。按照此等效模型进行的仿真，结果可以表征储能电容特性。

恒流充电性能测试

恒流充电测试是在储能电容上施加一个恒定的电流，电流为控制信号，电位为测量响应信号，主要研究电位函数随时间或电流变化的规律。

采用恒定电流进行充电时，如果电容量 C 为恒定，那么 du/dt 将会是一个常数，即电位随时间线性变化，求得其斜率，即可得 $C = i du/dt$ 。本文采用恒流充电测试法，来研究储能电容在不同的充电模式下的工作状况下参数的变化。

通常情况下为了将储能电容充电，如果直接采用电压源充电，充电效率不会高于50%。如果采用恒定电流源充电，效率可以接近100%。本文使用PWM控制技术，设计恒流源，电路如图4所示。

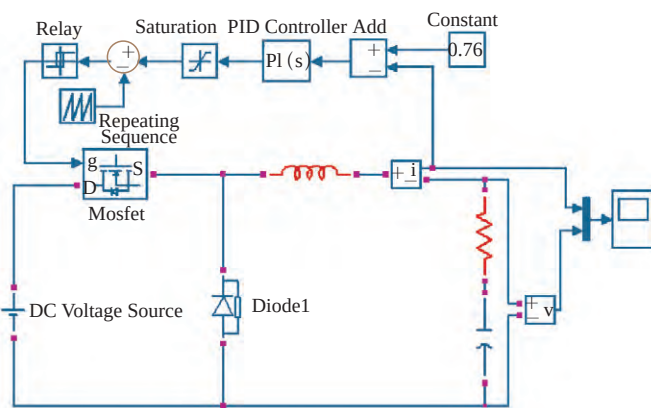


图4 储能电容传统恒流充电电路原理图

在电路工作的过程中，要时刻监测流入储能电容的电流，如果将此电流与设定值进行比较，两个之间的差值做PI调节，通过PI调节后输出的值与三角波进行逻辑比较，输出的信号给MOSFET的门极，控制MOS管的导通关断，最终实现恒流控制。

性能测试

恒流充电测试法是一种比较直观准确的电容测试方法，它测量的指标主要是在充放电过程中电容量与内阻的变换规律。本文主要测试不同充放电电流下，储能电容的电容量与内阻所表现出来的性能。一般情况下，选定的测试电流值为 $0.1 I_{\max}$ 、 $0.25 I_{\max}$ 、 $0.5 I_{\max}$ 、 $0.75 I_{\max}$ 和 $I_{\max}$ 。

1. 电容量性能测试

由试验结果可知，随着充电测试电流的增大，计算所得的储能电容电容量近似线性变小。其降低的原因正是由于在进行充电时，电极极化反应的比表面积和微孔传输反应粒子、离子的速度受充电电流的影响，当电流增大时，碳电极的有效反应表面积和微孔的利用率将减小，从而会使储能电容的有效电容量降低。如图5所示。

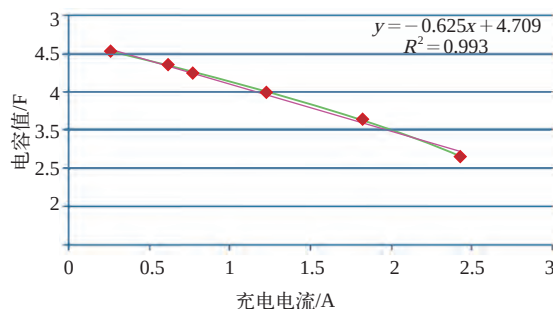


图5 储能电容在不同充电电流下电容量

(下转第105页)

过程,运行过程和停止过程。准备开启过程是:烧冷电控系统内所有的联锁设备必须都已准备好,并且都选择集中自动控制方式,最后等环冷鼓风机、助燃风机、主抽风机、机头除尘风机和点火炉都已开启,才能进行开启过程。当处于开启过程中时,下游设备无法开动,则上游设备不能开启。当处于设备运行过程中时,如果下游一设备停止,则上游设备全部停止,如果上游一设备停止,下游设备不需要自动停止。上位画面设置“与成品系统联动”按钮,当选择两系统联锁时,成品系统不起动,烧冷系统不允许起动;相反,烧冷系统不停,成品系统不允许停。

3) 成品筛分系统、机头除尘系统、机尾除尘系统和筛分除尘系统共用一套CPU, CPU选用西门子S7-416, 非冗余配置,下挂3个ET200站。主要控制5条成品皮带、电振筛分、卸料小车、返粉皮带、除尘卸灰阀等设备,在自动控制方式下,成品系统分为成品1和成品2两个流程,流程内相关连的设备相互联锁。在运行过程中,若流程内的某个设备因意外或故障发生停止,其上游联锁设备也会停止。两个流程间可以通过HMI设置联锁

关系,另外成品系统和烧冷系统之间的联锁关系也可以通过HMI进行设置。HMI画面上设置急停按钮,可以在任何情况下紧急停止整个流程的所有设备。

系统应用效果

该烧结机自动化系统自2013年8月投运以来,运行良好。从实际生产运行情况看,由于“透明工厂”理念的成功应用,极大地方便了操作人员对整个系统的监控、工程师维护工作,大大地减少的故障停机时间,大大地提高了生产率。强大实时、历史数据库,记录了烧结机生产的过程控制特性,给烧结机稳定生产提供了有力的支持。

结束语

由济自信承担建设的山西某钢厂360 m²烧结机工程的自动化系统无论从投产后运行的顺利程度还是从生产状态的稳定性来看,都达到了国际先进水平,产业化和推广应用的前景广阔。EA

(收稿日期:2015.03.01)

(编辑:白文亭)

(上接第90页)

2. 储能电容的内阻特性

采用阶跃法的原理测试超级电容器的内阻。当储能电容处于平衡状态时,如果工作电流突然变化,而储能电容两端的电流没有改变,等效电容在电流突然变化时则可以看成开路,内阻有电流通过,从而造成电压的突然升高或降低。

由仿真储能电容在上述不同测试电流信号下,计算内阻的值,经过拟合得到的结果如图6所示。

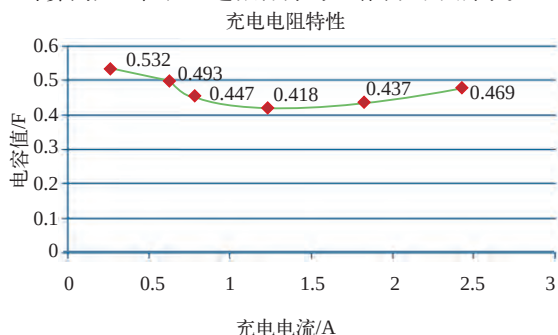


图6 储能电容不同充电电流与内阻的关系

结束语

通过储能电容恒流充电测试,可以得到在不同的充电电流作用下储能电容的电容特性以及内阻特性。其结论如下。

1) 储能电容的电容在不同的充电电流作用下,变幅很小,所以在实际应用的场合,可以看作是定值。

2) 储能电容在不同的充电电流作用下,由于内阻的存在,会使电压产生一定范围内的突变,尤其在小电流的作用下,内阻对输出电压的影响较大。EA

(收稿日期:2015.04.10)

(编辑:杨得润)