

地震荷载作用下核级(IE)蓄电池电气性能研究

阮善发, 张楚芳

(河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098)

摘要 简要介绍核级蓄电池模拟地震试验的试件选择、安装环境的模拟以及试验的基本程序, 重点讨论地震荷载作用期间蓄电池连续放电特性, 以及试验前后蓄电池容量的考核等电气特性问题. 验证了样机设计的可靠性及合理性, 为改进设计及现场安装提供了依据. 还论证了国产蓄电池应用在核电领域中的可行性.

关键词 地震荷载 核电站 蓄电池

中图分类号 :TL36

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2000)02-0081-04

强烈地震是一种破坏力极大的自然灾害. 对核电站来说, 在地震荷载作用下, 能否安全运行及安全停堆, 避免重大核安全事故的发生, 显得十分重要. 因此, 核电站的一些重要设备如蓄电池等必须符合核级抗震要求.

秦山核电站是我国自行设计建造的第一座核电工程, GFD 固定型铅酸核级蓄电池应用于该电站二期工程 IE 级 K3 类的直流系统中, 属 I 类抗震设备. 正常运行状态下, 蓄电池组与充电器并联运行. 在充电器发生故障或供充电器的 380 V 交流电源失去时, 蓄电池可不间断地向用电设备提供直流电源, 且至少维持 1 h, 并能在正常运行时充电器不能处理的瞬间尖峰负荷供电. 在地震荷载作用下, 其电气性能能否满足核级 I 类抗震标准, 必须用地震模拟试验来鉴定.

1 地震荷载的模拟

1.1 试件的选择

若要体现地震荷载作用下电池的电气性能, 试件的选择必须满足一定的条件, 即试件的外形尺寸最大, 极板活性物质最多, 抗震性能最薄弱, 同时试件需经过 10 年以上的自然老化期. 根据以上要求, 电气性能地震试验研究所用的蓄电池是由山东石横电厂替换下来的经过 10 年以上自然老化的典型试件.

1.2 试件安装环境的模拟

地震试验以模拟核电厂的现场安装排列方式及最大限度符合蓄电池的边界条件为准, 试验安装固定与工程现场安装固定方式一致, 采用 $3 \times 2 = 6$ 只蓄电池构成一组进行试验.

蓄电池的 3 只串联方向为试验的 X 轴向, 与之垂直的水平方向为试验的 Y 轴向, 垂直于水平方向为试验的 Z 轴向, 试件及支架的 $X-Z$ 轴向安装如图 1 所示. $Y-Z$ 轴向试验是将试件绕 Z 轴旋转 90° 后重复 $X-Z$ 轴向的试验.

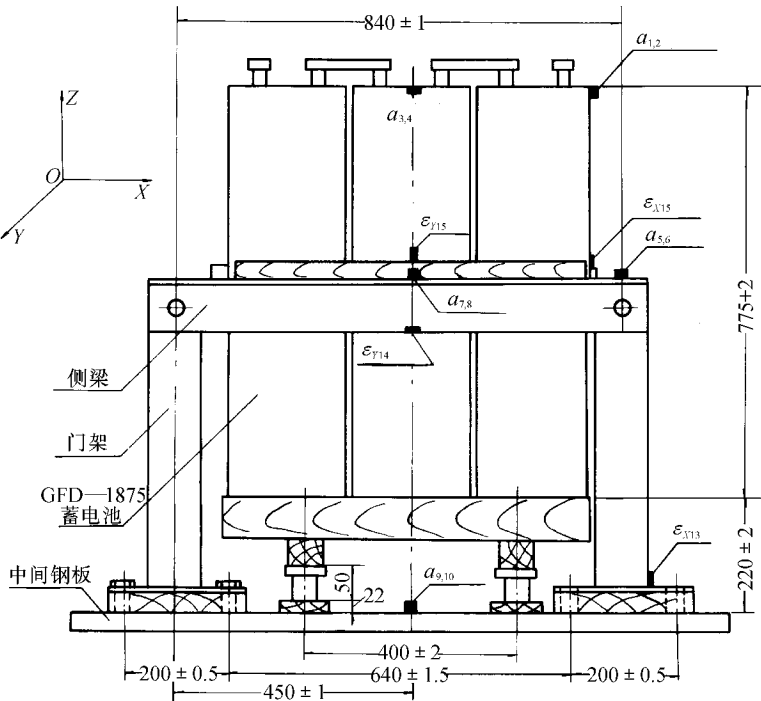


图 1 试件安装及测点布置

Fig. 1 Sample installation and measuring points

1.3 模拟地震驱动波的生成

在抗震设计上,核电站要求在一般地震情况下不停止生产,在极特殊地震情况下不发生核扩散事故.前者称为运行基准地震 OBE(Operating Basis Earthquake),后者称为安全停堆地震 SSE(Safe Shutdown Earthquake).与多数国家一样,我国对核设备也采用 OBE 和 SSE 两种考核方式.

根据核安全级铅酸蓄电池抗震试验的要求,OBE 和 SSE 地震试验要求的反应谱(RRS)采用的是秦山核电站二期工程 LX 厂房 + 3.75 m 标高层反应谱(阻尼比为 5%),分别乘以 0.75 和 1.5 后,经计算机反演计算生成人工地震波,以此作振动台系统的输入波,所生成的人工地震波反应谱应包络原设计反应谱.

由于由计算机控制的振动台系统是一个复杂的非线性系统,各频段的系统响应不可能保持一致,无法满足其频响特性所要求的设计反应谱,必须对系统响应进行若干次负反馈迭代.当迭代得到的响应信号与期望信号的误差达到要求后,即得到满意的台面驱动信号,用此信号驱动振动台即可再现期望误差范围以内的响应信号,其反应谱也就能够很好地包络所期望的反应谱.图 2 为 X-Z 轴向台面驱动反应谱及由计算生成的反应谱(Y-Z 轴向图略).

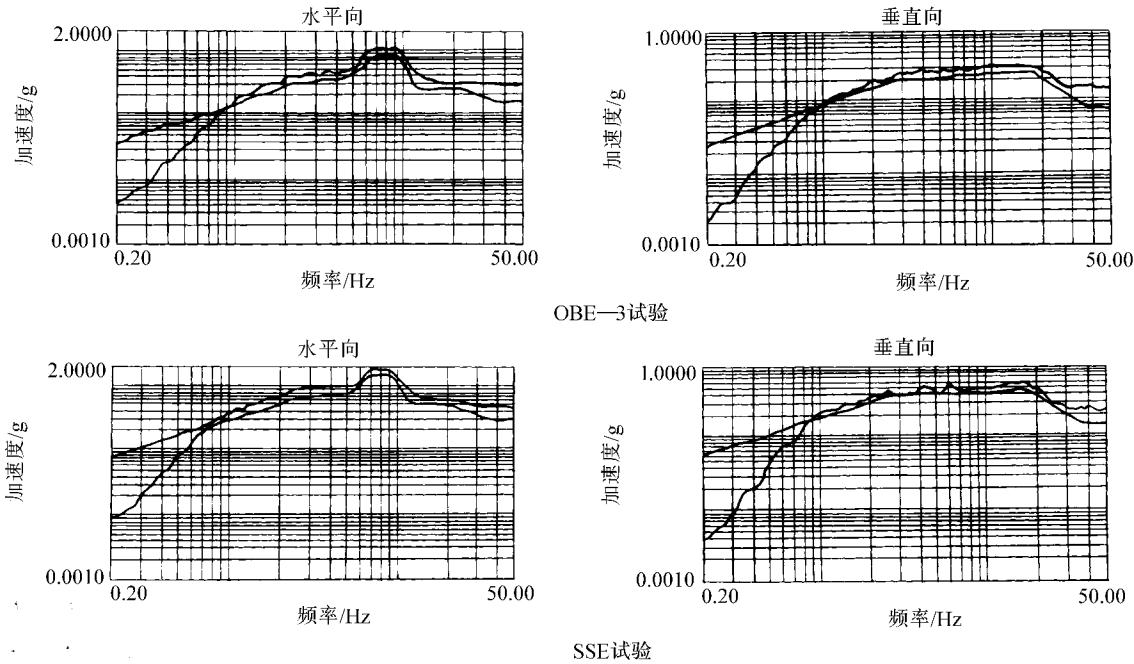


图 2 计算生成的加速度反应谱及台面激励加速度反应谱(TRS)

Fig.2 Acceleration response spectrum produced by computing and table response signal

1.4 地震试验的基本程序

按照核级设备抗震试验的要求,在地震荷载试验之前,首先对试件进行 1 次白噪声扫描试验,以确定试件在模拟现场安装环境下的自振特性,如自振频率、阻尼比、放大倍数等,然后连续进行 5 次运行基准地震(OBE)的试验,紧接着进行 1 次安全停堆地震(SSE)试验,以鉴定设备在地震作用期间和作用后能否执行其所要求的功能.最后还进行 1 次白噪声扫描试验,探查地震荷载作用前后试件自振特性的变化.

2 核级蓄电池地震荷载作用下电气特性的考核

2.1 GFD 铅酸蓄电池连续放电特性的考核

作为秦山核电站二期工程所选用的核级蓄电池,除考核地震荷载对其刚度、强度等机械性能影响外,另一项重要的考核内容就是检验蓄电池在地震荷载作用期间和作用后的电气特性能否满足抗震设计要求.后项考核在通过前项考核的基础上才有效.

考核试验所用的蓄电池是经过 10 年自然老化的设备,其电极板、电极引线等电气性能不同程度地受到老化影响.要确定受影响的程度及部位,在地震荷载作用下能否稳定可靠地工作,就必须通过地震模拟试验来考核.图 3 为考核蓄电池连续放电性及稳定性性能的电原理图.

台面地震波振动的持续时间为 30 s,在此期间内,计算机连续不断地记录地震荷载作用下蓄电池端电压的变化过程,试件的 X-Z 轴向第 3 次 OBE 及 SSE 地震试验的端电压变化过程如图 4 所示(Y-Z 轴向图略).由图可以看出,在整个 30 s 的地震试验过程中,蓄电池端电压无跳变,变化幅度≤5%.这表明,地震荷载作用期间,蓄电池仍能稳定可靠地工作,符合Ⅰ类抗震设备设计要求.

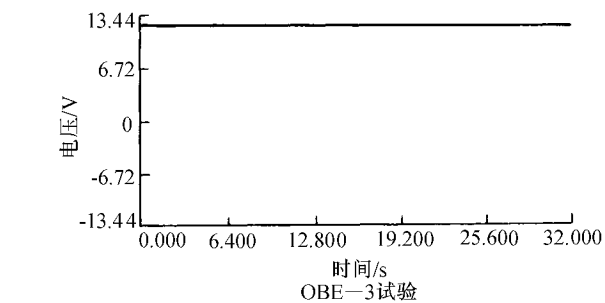


图 4 X-Z 轴向蓄电池组串联回路电压值记录
Fig.4 Voltage value record of storage battery series in X-Z axis

2.2 地震前后蓄电池容量的考核

经过 10 年自然老化的蓄电池,在其寿命终结之前,其电气性能能否满足核安全性的要求,电池容量是否在合格寿命的容量范围内,这是在抗震试验之前首要鉴定的技术指标.按设计标准的要求,蓄电池容量低于制造厂额定容量的 80% 时,表明其有效使用寿命已终结,应更换蓄电池.地震荷载作用前蓄电池容量的检定,是在被试验的蓄电池处于充足电的条件下,以 3 h 放电率(所有制造厂对各种型号的蓄电池所提供的一致标准)放电至每个电池的平均电压为 1.75 V,然后重新充电.振前 3 h 的放电记录见表 1.所选电池 3 h 放电的容量可由下式来计算:

$$C_3(20^{\circ}\text{C}) = \frac{C_n}{1 + Z(t - 20)}$$

式中: $C_3(20^{\circ}\text{C})$ ——基准温度 20℃ 时的 3 h 率放电容量; C_n ——实测容量; Z ——温度系数, $Z = 0.006$ (国际); t ——放电初始温度.

表 1 抗震试验前 3 h 率放电记录
Table 1 Record of 3h rate discharge before earthquake test

放电电流 /A	放电时间 /min	温度 /℃	放电电压/V						密度 /(g·cm ⁻³)
			1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	
458	0	32	1.96	1.96	1.96	1.95	1.95	1.95	1.25
458	60	34	1.93	1.93	1.92	1.93	1.93	1.93	1.24
458	120	36	1.89	1.90	1.89	1.89	1.89	1.89	1.22
458	180	36	1.85	1.85	1.84	1.84	1.83	1.83	1.20
458	225	36	1.76	1.77	1.75	1.76	1.76	1.76	1.15

按上式计算, $C_3(20^{\circ}\text{C}) = 1\,602.1\text{ Ah}$.
根据技术指标的要求,该蓄电池的额定容量为 1 875 Ah,经过 10 年自然老化后,充足电的情况下,振动试验前实际放电容量为 1 602.1 Ah,为 3 h 率额定容量 1 375 Ah 的 116.5%,符合Ⅰ类抗震设备设计要求.
安装在核电厂内的蓄电池设备,通常采用良好的隔振措施,尽量避免蓄电池承受振动,否则将影响它的使用寿命.但是突发性地震所引起的蓄电池性能的下降,将对核电站的安全运行构成威胁.在振动台上对蓄

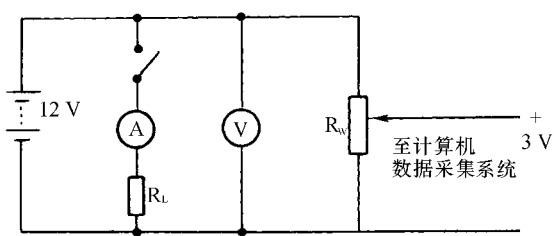
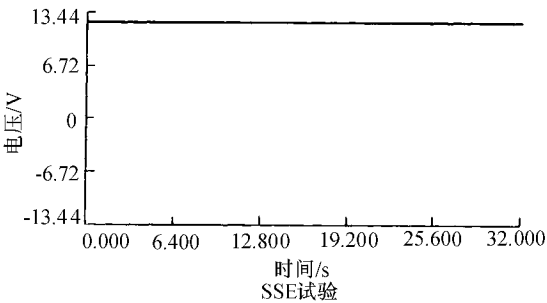


图 3 考核蓄电池连续放电性及稳定性的原理
Fig.3 Principle of checking storage battery continuous discharge and stability



电池进行地震试验,能够有效模拟地震荷载对其电气性能的影响,以确定该试件在地震荷载作用期间及作用后能否继续履行其职能. 根据抗震设计的要求,经过 10 年自然老化的蓄电池,在地震荷载作用后至少仍能释放 80% 额定容量的能量. 如果放电容量低于额定容量的 80%,则在环境温度下使蓄电池返回到浮充电状态下重新充电,供给正极板的浮充电电位应高于蓄电池开路电位 50 ~ 100 mV,其充电时间大于或等于 72 h,并继续试验,如果第二次试验失败,说明该蓄电池已无法正常工作.

振动后容量试验电原理图与振动试验前相同. 表 2 为 GFD 铅酸蓄电池振动试验后容量试验记录,其容量换算方法同上. 经计算,该电池实际放电容量为 1 619.0 Ah,为 3 h 率额定容量的 117.7%,略高于抗震试验前的电池容量.

表 2 抗震试验后 3 h 率放电记录
Table 2 Record of 3 h rate discharge after earthquake test

放电电流 /A	放电时间 /min	温度 /℃	放电电压/V						密度 /(g·cm ⁻³)
			1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	
458	0	38	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.25
458	60	38	1.96	1.96	1.96	1.96	1.94	1.95	1.24
458	120	38	1.92	1.92	1.91	1.91	1.91	1.91	1.22
458	180	39	1.85	1.86	1.86	1.85	1.85	1.86	1.20
458	235	40	1.77	1.78	1.75	1.76	1.76	1.77	1.15

由表 1、表 2 的数据可知,地震试验前后,蓄电池电解液的密度未发生变化,电池组中各电池的端电压略有差异,而试验后蓄电池的电解液温度明显高于试验前的电解液温度,电解液的导电性能有所提高,该蓄电池地震荷载作用前后其电气性能未发生质的变化,此项电气性能指标符合核安全级要求.

3 结 语

GFD 铅酸蓄电池是用于秦山核电厂二期工程 IE 级重要的电气设备. 通过对其模拟地震荷载作用下的电气特性的研究,验证了样机设计的可靠性及合理性,为改进设计及现场安装提供了依据. 揭示了蓄电池在核电领域中的应用规律,为今后我国再建核电站、核热站、核反应堆推广应用国产核蓄电池铺平了道路. 本次电气设备的地震荷载试验研究成果,还可应用于其它核电工程.

参考文献:

[1] GB 13625—92 核电厂安全系统电气设备抗震鉴定[s].

Study on Electrical Performance of IE Storage Battery
under Earthquake Load

RUAN Shan-fa, ZHANG Chu-fang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The paper briefly introduces the selection of test-sample of the IE storage battery for earthquake simulation test, simulation of installation environment, and the basic test process, emphatically discusses the electrical performance of the storage battery under the action of the load and the check of capacity before and after the test. The realiability and rationality of the design of the prototype are verified, providing a basis for the improvement of design and in-situ installation. The feasibility of application of home-made batteries in the field of nuclear power is also discussed.

Key words earthquake load ; nuclear power plant ; storage battery