

文章编号：0258-0926(2015)02-0134-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.02.0134

核电厂安全级蓄电池质量鉴定相关问题的探讨

毋琦, 任莉华*, 郎爱国, 李世欣

环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 针对核电厂安全级(1E级)蓄电池鉴定试验项目和条件、加速老化过程中的部件更换、老化过程中的容量试验等3个问题进行讨论, 结合国内外1E级蓄电池的鉴定实践, 提出关于这3个问题的一些看法和见解。

关键词: 核电厂; 安全级(1E级); 蓄电池; 鉴定; 加速热老化; 容量试验

中图分类号: TM623 **文献标志码:** A

Discussion for Related Issues of Nuclear Safety Lead Storage Batteries Equipment Qualification

Wu Qi, Ren Lihua*, Lang Aiguo, Li Shixin

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 10082, China

Abstract: The qualification test sequence and conditions, components replacement during the accelerated aging test, and capacity test on the aging of nuclear safety lead storage batteries are discussed in this paper. Considering the class 1E cable qualification practices at home and abroad, this paper proposes some points and technical positions related to the three mentioned issues.

Key words: Nuclear power plant, Safety (1E), Lead storage batteries, Equipment qualification, Accelerated aging test, Capacity test

0 引言

为了保证核电厂内冗余设置的安全重要系统和设备不会因某种故障机理而导致共因失效, 我国的核安全法规HAF102《核电厂设计安全规定》中规定必须对核电厂安全重要物项进行合格鉴定, 以验证“设备在整个寿期内能满足处于需要作用时的环境条件(如振动、温度、压力、喷射流冲击、辐射、湿度)下执行安全功能的要求”。IEEE Std. 323-2003《IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations》标准中关于设备鉴定的定义为:“产生和保持证明设备在正常、异常环境条件和设计基准事故下能够按照系统性能要求执行功能的证据

的过程”。

从上述定义可以看出:核安全设备的鉴定是一个产生证据的过程,设备鉴定可以采用试验、分析计算、运行经验方法或3种方法的组合进行,是设计验证的一种手段;其目的是证明设备能够在其寿期内可能运行的环境条件下执行其安全功能,包括正常、异常和事故环境条件。

核电厂安全级(1E级)蓄电池作为在正常工况下和设计基准事故期间及随后的规定时间内向核电厂安全级仪表和控制系统(包括部分工艺设备)提供电力的重要设备,必须按照相关的标准制定鉴定大纲和程序,并进行质量鉴定。目前,我国核电厂所使用的1E级蓄电池多为富液式铅酸

收稿日期:2014-08-14;修回日期:2014-10-28

作者简介:毋琦(1982—),男,高级工程师,现从事核安全设备审评与安全检验工作

*通讯作者:任莉华, E-mail: renlihua@chinansc.cn

蓄电池,其鉴定一般按照IEEE Std.323标准中的原则要求,参考IEEE Std.535《IEEE Standard for Qualification of Class 1E Lead Storage Batteries for Nuclear Power Generating Stations》中的具体要求进行鉴定。

本文将对1E级蓄电池的鉴定过程和鉴定试验要求进行描述,重点针对蓄电池的鉴定试验项目和条件、蓄电池老化过程中的部件更换和加速热老化试验过程中的容量试验等3个问题进行讨论。

1 蓄电池鉴定试验项目和条件

IEEE Std.323 标准给出了1E级电气设备鉴定的通用试验顺序,主要试验项目有:

- (1) 设备正常环境条件下的基准功能试验。
- (2) 设备在极限环境条件下的功能试验,包括设计基准事故及事故后的环境条件。
- (3) 如果设备存在显著老化机理,设备应当进行用于确定其鉴定寿命的老化试验。
- (4) 机械振动老化试验。
- (5) 抗震试验。
- (6) 设计基准事故工况下的安全功能试验,如设备在设计基准事故后仍需执行安全功能,则还应当包括设计基准事故后的功能试验。

按照 IEEE Std. 323 中的要求,在进行上述第(3)项中的老化试验前,首先要确定设备,包括设备中的安全级部件,是否具有显著老化机理(见 IEEE Std.627)。如果可以确定由于设备老化所造成的设备功能和性能的劣化与设计基准事故下的设备功能没有相关性,则在设计基准事故模拟试验之前可不对设备进行模拟老化。

美国电力研究协会在其研究报告 EPRI NP-5024《Seismic Ruggedness of Aged Electrical Components》中对大量的仪控电气设备和部件进行了老化前后的抗震性能分析对比,得出结论:对于核电厂中大部分安装在和缓环境中的仪控电气设备,其抗震性能与设备老化之间没有相关性,但是试验证明铅酸蓄电池具有老化-地震相关性。因此,在进行铅酸蓄电池的抗震试验之前,必须进行用于确定其鉴定寿命的老化试验。按照 IEEE 323 中的规定,上述老化试验包括运行老化和辐照老化。

IEEE Std.323 标准给出了核电厂1E级电气设备鉴定试验的通用顺序;在 IEEE Std.535 标准中

针对1E级蓄电池的鉴定试验给出了更为具体的试验顺序:辐照老化试验、热老化试验、抗震试验。对于辐照老化试验,在 IEEE Std.535 中特别提到:如果在蓄电池的整个运行寿期内,接受的辐照剂量不超过 100 Gy,则可不进行辐照老化模拟试验。

在我国核电厂中,1E级蓄电池均安装在核电厂安全壳外的电气厂房中,在蓄电池的运行寿期内其接受的辐照总剂量远低于 100 Gy,因此在进行1E级蓄电池的质量鉴定过程中,辐照老化模拟往往是不需要进行的。

对于蓄电池的热老化试验可以采取自然老化和加速老化,或组合的方式进行。在 IEEE Std.535 标准中特别强调针对蓄电池的老化模拟要基于电池的正极板的老化机理。该标准根据蓄电池正极板的材料给出了不同的加速老化试验条件(表1)。该标准对1E级蓄电池在进行加速热老化试验过程中的温度控制有明确的要求:对于铅钙和铅锑2种类型的正极板蓄电池,必须按照表1中的温度进行加速老化试验,试验过程中的温度控制范围为-1~3。这意味着,在1E级蓄电池的加速老化试验过程中,试验方不应当根据阿伦纽斯定理或“10法则”,通过改变试验温度的方式缩短或延长试验时间。

1E级蓄电池在核电厂中的安装位置一般为安全壳外的电气厂房内,安装和运行环境条件属于和缓环境条件,按照电厂的安全分析,其在运行寿期内可能发生的设计基准事故一般仅考虑地震事故工况。因此,在1E级蓄电池的鉴定试验项目中必须包括抗震试验[运行基准地震(OBE)和安全停堆地震(SSE)]。

表1 1E级蓄电池加速热老化试验条件
Table 1 1E Battery Accelerated Thermal Aging Factors

蓄电池正极板材料类型	加速老化试验条件(等效25环境温度下1a自然老化)	
	试验温度/	试验时间/d
铅钙极板	63	20
	71	10
铅锑极板	63	25

在 IEEE Std.323 标准的鉴定试验通用顺序中,适用于安全壳外的电气设备的试验项目还包括了设备在极限环境条件下的功能及性能试验,而在 IEEE Std.535 标准中并没有考虑该试验项

目。笔者认为：需要结合不同电厂的实际情况，综合考虑 1E 级蓄电池在电厂中的安装环境条件及其所在厂房的辅助支持系统的设计准则，分析厂房内可能出现的异常环境条件，以确定是否需要蓄电池的鉴定过程中对蓄电池进行异常环境试验。

以 M310 改进型核电厂为例，1E 级蓄电池所安装的电气厂房内通风空调系统配置为冗余设置，且抗震设计为在 SSE 工况下，通风空调系统能够保持其正常功能。另外在 M310 核电厂中配有冗余设置的 2 台应急柴油发电机组，在出现失去厂外电的情况下（II 类工况），通风空调系统的电力供应由应急柴油发电机组提供。因此，由于失去厂外电造成电气厂房的环境条件发生变化的情况基本不会发生；所以在用于 M310 核电厂中的 1E 级蓄电池鉴定试验过程中不需要考虑异常环境试验。但是，AP1000 核电厂则情况不同；AP1000 核电厂中没有设置 1E 级应急柴油发电机组，因此必须考虑失去厂外电所造成通风系统丧失所导致的电气厂房的环境条件变化，按照分析计算所得出的异常环境条件在抗震试验之前对蓄电池进行异常环境试验，同时还应当对通风系统丧失的频率进行保守的假设和估算；在进行蓄电池加速热老化的试验过程中可以考虑穿插进行若干次异常环境模拟试验，尽可能保守和真实地模拟蓄电池的长期运行情况。

2 老化过程中的部件更换

按照 IEEE Std.535 标准中的要求，在进行 1E 级蓄电池抗震试验之前，蓄电池应当按照标准中规定的热老化条件和方法老化至其鉴定寿命末期。热老化试验条件的确定主要基于蓄电池正极板的老化机理；但是，很显然蓄电池中还包括其他容易老化的部件，如密封件等。IEEE Std.535 标准中规定在蓄电池老化过程中允许对不在电流通路上的部件在抗震试验之前进行更换，但是所更换的部件必须被证明已经至少老化至与蓄电池鉴定寿命相同的年限。

关于 IEEE Std.535 标准中的上述规定，主要是因为 1E 级蓄电池的老化条件是基于正极板的老化机理确定的。如果蓄电池上的其他功能部件比正极板更易老化，则按照该标准中的加速老化

条件将被鉴定的蓄电池老化至寿命末期时，这些功能部件事实上已经存在“过老化”的情况；这些功能部件的过老化状态可能导致蓄电池无法通过后续的抗震试验。因此，该标准允许在电池的加速老化试验过程中对这些功能部件进行更换，但是必须要证明更换后部件在抗震试验之前已经被老化到了至少与蓄电池鉴定寿命相同的年限。

如何证明在加速热老化过程中除极板和极柱以外的其他功能部件已经被老化至与电池的鉴定寿命相同的年限，笔者认为应当以已知这些部件的活化能作为前提条件，根据阿伦纽斯公式计算在相应的试验条件下，这些部件是否已被老化至相应年限。例如：假设正极板为铅锡合金的蓄电池中的密封件活化能为 1 eV，电池的鉴定目标为 25 下，鉴定寿命 20 a，电池的热老化试验温度为 63 ，则根据阿伦纽斯公式可计算得出，该密封件加速老化至 2125 h 时，已经达到了 20 a 寿命；但 2125 h 的老化时间对应蓄电池仅相当于 3.5 a 的老化；在这种情况下，如果要考虑在抗震试验之前更换该密封件，则可以在蓄电池加速老化试验进行至 412.5 d（对应电池寿命 16.5 a）时对该密封件进行更换，以确保所更换的密封件在抗震试验之前同样被老化至与电池寿命相同的年限。

蓄电池的正极板一般是铅钙或铅锡合金材料；材料的活化能比较低，一般低于 0.7 eV，而蓄电池上其他的易老化部件往往是非金属材料，活化能一般在 0.9 eV 以上；这意味着为防止抗震试验之前部件处于过老化状态，蓄电池上大量的易老化部件（不处于电路上的部件）都可以在加速老化过程中予以更换。另外，尽管通过阿伦纽斯公式在已知相关部件活化能的情况下，可以计算得出这些部件是否已被老化至与蓄电池鉴定寿命相同的年限，但事实上，蓄电池上大量的部件活化能往往是未知的，选择比较保守的活化能是比较简单的处理方式。例如：对于铅锡极板的蓄电池（鉴定目标为 25 ，鉴定寿命 20 a），如果保守地选择 0.78 eV 的通用活化能（IEEE Std.382 中的推荐值）作为蓄电池上非金属部件的活化能，则可以在蓄电池老化至 9000 h 时（总的加速老化时间为 12000 h，剩余 3000 h），对可能影响蓄电池抗震试验结果的非金属部件（不处于电流通路上的部件）进行更换。

3 老化过程中的电池容量试验

在 IEEE Std.535 标准中,要求在 1E 级蓄电池老化试验之前和老化试验之后各进行一次容量试验,并要求在容量试验过程中放电率为 3 h^{-1} ,但是没有提及蓄电池老化过程中的容量试验。在该标准中提到“1E 级蓄电池的寿命不会被每年两次深度放电所影响”;因此,按照该标准中所描述的蓄电池老化试验方法进行试验所确定的鉴定寿命,对于运行寿期内平均每年不超过 2 次性能试验的蓄电池是有效的。如果运行寿期内每年的性能试验次数超过 2 次,则需要按照该标准中的要求对蓄电池在老化过程中进行补充容量试验。该标准中特别提到,补充容量试验次数不应当超过在蓄电池老化过程中进行试验的时间点所代表的运行年限内蓄电池可能增加的性能试验次数。

美国核管会(NRC)在管理导则 R.G.1.158 中关于老化过程中的容量试验(性能试验)特别指出:在通过自然老化或加速老化试验方法对 1E 级蓄电池进行老化的过程中,必须考虑所有对蓄电池功能产生影响的可能因素。在蓄电池运行过程中,导致蓄电池功能劣化的过程及环境因素存在一定的不确定性,如运行循环、充放电次数、环境条件的变化等因素。NRC 认为采用 IEEE 535 标准中所提到的方法并不能充分模拟 1E 级蓄电池运行过程中可能发生的所有的劣化因素。

核电厂 1E 级蓄电池的设备状态和寿命与其在运行过程中的充放电次数(维护试验、性能试验)密切相关,在各个核电厂的 1E 级蓄电池运行和维修手册或规范中均规定了蓄电池的定期试验周期和试验准则;因此在进行蓄电池的加速热老化过程中,必须考虑模拟蓄电池在运行过程中的循环次数、维护试验和性能试验。但是,在进行 1E 级蓄电池鉴定过程中,确定电池在其整个运行寿期内可能经历的性能试验、维护试验、运行循环次数比较困难,开发一种试验方法可以包络蓄电池在运行过程中可能经历的维护试验和性能试验是非常必要的。

在 IEEE Std. 450-2002 《IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Vented Lead-Acid Batteries for Stationary Applications》中提出的“改进性能试验”可以等效于蓄电池在任何时候进行的维护试验和性能试验,并提出了改进性能试验的方法和原则。

NRC 通过 R.G.1.129 认可了 IEEE Std. 450-2002。导则中强调:NRC 认可改进性能试验可以代表(等效)蓄电池在运行过程中任何时刻进行的维护试验和性能试验;改进性能试验的方法和准则应当满足 IEEE Std.450-2002 附件 1 中的要求。同时,导则中要求改进性能试验的试验间隔应当不超过 24 个月;如果蓄电池已经达到其预期寿命的 85%,同时容量低于额定容量,那么试验间隔就要变为 12 个月 1 次。在 AP1000 核电厂 1E 级蓄电池鉴定过程中,相关供应商和试验机构采用了上述方法,在蓄电池老化模拟每 2 年后就进行 1 次改进性能试验,用于包络电池实际运行 2 年内可能进行的维护试验和性能试验。笔者认为这种在 1E 级蓄电池加速热老化过程中采用改进性能试验的方法模拟蓄电池的实际运行过程更为保守和科学。

4 结束语

1E 级蓄电池是核电厂安全级仪控系统(包括部分工艺设备)执行安全功能所必需的重要设备,尤其是在 AP1000 三代核电技术中没有设置 1E 级的应急柴油发电机组,因此 1E 级蓄电池的质量和性能对于电厂安全运行和缓解事故至关重要。本文针对蓄电池鉴定过程中,鉴定试验项目和条件、老化过程中的部件更换、老化过程中的容量试验这 3 个问题进行了探讨,提出了笔者的一些看法和见解,希望能够对我国的 1E 级蓄电池设备鉴定工作有所帮助。

(责任编辑:马蓉)