

# 核电厂电磁兼容挑战及应对策略

邱建文<sup>1</sup>, 孔海志<sup>1</sup>, 莫国钧<sup>2</sup>

(1. 中科华核电技术研究院有限公司, 北京 100086; 2. 中国广东核电集团有限公司, 广东 深圳 518031)

**摘要:**分析了核电厂的电磁环境, 比较了主要核电国家有关核电厂安全重要仪表和控制(I&C)系统的电磁兼容(EMC)要求及评价方法, 指出了中国现行电磁兼容技术标准的不足, 介绍了针对大亚湾核电厂现有反应堆安全保护系统的电磁兼容性试验, 针对核电厂安全重要电气设备电磁兼容技术标准的建立与实施提出了建议。

**关键词:**核电厂; 安全; 仪表与控制; 电磁兼容性; 设备鉴定

中图分类号: TL362

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)S1-0360-04

## Tactics and Challenge to Electromagnetic Compatibility in Nuclear Power Plant

QIU Jian-wen<sup>1</sup>, KONG Hai-zhi<sup>1</sup>, MO Guo-jun<sup>2</sup>

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute, Beijing 100086, China;

2. China Guangdong Nuclear Power Holding Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** This paper focuses on the analysis of present situation for electromagnetic environments in nuclear power plant. The simulation test demonstrating the vulnerability of reactor safety protective system in the Daya Bay Nuclear Power Plant was introduced. Requirements and test methods about how important to safety instrument and control system to accommodate electromagnetic interference, radio-frequency interference and power surges in the environments of nuclear power plant, were discussed.

**Key words:** nuclear power plant; safety; instrumentation and control; electromagnetic compatibility; equipment qualification

保护电磁环境、防止电磁干扰、解决电磁兼容的问题, 已引起世界各国及相关国际组织的普遍关注。许多发达国家及国际组织近年均制定了相应的法规及标准, 如德国的 VDE 法规、美国的 FCC 法规以及国际无线电抗干扰特别委员会(CISPR)制定的国际标准和实验方法等, 以限制电子公害的发展。先进的仪控系统

(I&C), 包括模拟和数字电子设备, 已逐步在核电厂大量应用, 随之而来的核电厂的电磁兼容问题也引起人们的高度关注。

在电力网内部因系统操作失误或出现异常工况甚至短路等故障, 会引起电力网系统出现内部过电压或电压瞬态降低的现象<sup>[1]</sup>。

在电磁兼容方面, 美国橡树岭国家实验室

(ORNL)和美国电力研究院(EPRI)对核电厂电磁兼容性问题已进行了大量研究。ORNL 核安全信息中心根据执照人事件报告(LER)对 I&C 系统在核电厂遭受的电磁干扰(EMI)/无线电射频干扰(RFI)和电源浪涌问题进行了统计<sup>[2-4]</sup>。在 1980—1991 年间,8%的非计划停堆和专设安全设施(ESF)的启动是由于 I&C 系统受 EMI 的作用造成的。在这期间,EMI 被认为是引起这些事件频率最高的环境因素。LER 显示,在 1990—1993 年间,19%的事件是由于数字化 I&C 设备遭雷击引起的,而这些事件中的 67%均导致了误跳堆和误动作。

美国核管理委员会(NRC)于 2000 年 1 月发布了管理导则 RG1.180-R0<sup>[5]</sup>,即《安全相关 I&C 系统 EMI/RFI 评价导则》。2003 年 10 月,NRC 发布了管理导则 RG1.180-R1<sup>[6]</sup>,该版本与国际电工委员会 IEC 的实验标准和方法即 IEC 61000 兼容,覆盖了电源线、信号线和相关高频试验导则,增加了对便携式通讯装置的处理意见。

近年来,我国国家质量技术监督局也相继发布了一系列有关电磁兼容性的标准,但国内针对核电厂电磁兼容性的测试以及相关标准适用性等技术研究工作尚处于起步阶段。

## 1 核电厂电磁环境条件

随着模拟电子技术的发展,许多目前由几块电路板所实现的功能可合并到单一的模拟电路板上,且运行在更低的电压水平下,因而使模拟电路对 EMI/RFI 更敏感,对电源浪涌也一样,需对电路采取相应的技术保护措施。

由于缺乏核电厂有效的现场电磁环境数据,便不能为核安全仪控设备制定合适的 EMC 导则。为此,NRC 从 1983 年开始开展了商用核电厂电磁环境的研究,委托 ORNL 对几个核电厂的电磁环境进行了长期调查<sup>[7]</sup>。调查进行了 14 个月,分别在 8 个不同类型的核电厂各种具有代表性的场所和典型的运行状态下进行,每个检测点数据采集的时间为 5 周(24 h/d)。ORNL 的调查表明:不同电站在同等场所和同样的运行状态下的电磁环境非常相似,数据显示<sup>[7]</sup>,最高电场强度相差在  $\pm 10$  dB 内,大多频段的最高磁场强度也相差在  $\pm 10$  dB 内,只有

5~20 kHz 频段范围内的最高磁场强度的测量值偏差  $\pm 20$  dB。EPRI 也在 20 世纪 90 年代对几个核电厂的电磁环境进行了短期调查。NRC 根据对核电厂电磁环境的调查报告,提出核电厂电磁环境对仪控系统有明显的影 响,为满足安全要求,对核电厂的电磁环境要加以限制。

韩国为进行原有模拟仪控系统的数字化改造,在 1998 年对 Kori 核电厂 1 号机组主控室进行了电磁干扰现场测试,并比较了几个核电厂电磁辐射噪声的实测结果<sup>[8]</sup>。结果表明:

1) 测量到的低频(100 Hz~1 kHz)传导辐射噪声最大幅值为 130 dB $\mu$ A,低于 EPRI-TR-102323<sup>[9]</sup>与 RG 1.180 规定的抗干扰限值(142 dB $\mu$ A),这些高幅噪声由入口处 60 Hz 电源的偶次谐波引起;

2) 测量到的高低频传导辐射噪声数据大多高于美国军用标准规定的抗干扰限值;

3) 电厂设备间的磁场低于 EPRI 在发电机控制盘附近测得的数据;

4) 韩国两个 CANDU 堆与其他压水堆电厂的高频辐射发射噪声在 EPRI 的限值内。

## 2 各国核电厂电磁兼容要求分析

### 2.1 美国核电厂电磁兼容要求

在核电厂电气设备/系统的电磁兼容问题研究中,美国走在了世界的前列。经过对典型核电厂在各种工况下的现场测量,美国制定了自己的电磁兼容标准。美国核电厂电磁兼容标准体现在 IEEE 323—2003<sup>[9]</sup>,在该标准的 6.3.1.7(C)中给出了可采用的存在 EMI/RFI 和浪涌电磁环境下的试验标准,即 IEEE 603—1998 附录 B 和 IEEE Std 7-4.3.2—2003 附录 C。在具体的试验导则方面,NRC 在 1996 年 4 月 17 日的安全评估报告(SER)中提出采纳 EPRI TR 102323-R1“电厂电磁干扰试验指导”,在 2003 年发布了管理导则 RG 1.180-R1“对核电厂安全相关仪控系统电磁与射频干扰的管理导则”。该导则认可在处理核电厂安全相关 I & C 系统的 EMI/RFI 和电源浪涌方面为 NRC 评审人员可接受的设计、安装和试验实践。

以下列出 RG1.180-R1 导则中所认可的一些 EMC 标准方面的某些要点,以便与其它国家的相关标准相比较。

1) 认可 IEEE Std 1050—96 中说明的设计和安装方法。

2) 认可采用 MIL-STD-461E 和 IEC 61000 系列标准所选择的 EMI/RFI 试验方法,以便评定安全相关 I&C 系统的传导和辐射 EMI/RFI 现象。

这些导则中采用最新版军用和国际标准的成套方法可互为替换使用。

3) 认可采用 MIL-STD-461E 和 IEC 61000 系列标准的电磁限值范围。

4) 认可 IEEE Std C62.41—91 和 C62.45—92 中说明的 SWC 试验方法。

5) 认可另一种采用 IEC 61000-4 的 SWC 试验方法。

RG1.180 中提供的信息反映在标准审查大纲(SRP, NUREG-0800)中,此导则与 SRP 修订的第 7 章“仪表与控制”是一致的。

## 2.2 法国核电厂电磁兼容要求

法国核岛电气设备设计和建造规则(RCC-E)2005 版 D5500 中规定核电厂中的设备和系统应能在核电厂的电磁环境下正常工作,这种工作能力应通过 EMC 试验得到验证。试验标准根据设备所处的电磁环境条件采用产品标准 IEC 61131-2 及相关的工业试验方法标准如 NF EN 61000-6-2, NF EN 61000-6-4, IEC/TS 61000-6-5 等。但未给出详细的试验方法和验收准则,可操作性不强。

## 2.3 德国核电厂电磁兼容要求

德国 KTA 3503 5.4“电磁兼容(EMC)试验”要求电气设备按照 DIN EN 61326“测量控制及实验室用途的电气设备-EMC 要求”进行试验,试验严格性根据设备所处的电磁环境确定,但不低于基础工业标准 DIN EN 61000-6-2 和 DIN EN 61000-6-4 的最低要求。同样未给出详细的试验方法和验收准则。可操作性不强。

## 2.4 中国核电厂电磁兼容要求

中国标准 GB/T 11684—2003《核仪器电磁环境条件与试验方法》<sup>[1]</sup>是根据国际电工委员会(IEC)后来未通过表决的标准版本 45A/429/CDV《IEC 61503 Ed. 11》制定的。该标准规定了核反应堆仪器抗电磁干扰的电磁环境条件分类、要求和试验方法,并在该标准的附录 C(规范性附录)给出了核反应堆仪器抗扰度试验

项目及其要求与试验方法,较法国、德国的标准详细。在其中的 4 个试验项目中,“高能脉冲加至交流电源抗扰度试验”与“高能脉冲加至信号与控制电缆抗扰度试验”试验方法采用了国标 GB/T 17626.5—1999(等同 IEC 61000-4-5:1995),但要求的脉冲形状明显存在错误(标准中的 1.2 ms 应为 1.2  $\mu$ s, 50 ms 应为 50  $\mu$ s),该错误来源于未通过表决的《IEC 61503 Ed. 11》;“辐射型抗扰度试验”试验方法采用了国标 GB/T 17626.3—1998(等同 IEC 61000-4-3:1995),频率扩展至 20 MHz;“静电放电抗扰度试验”试验方法采用了国标 GB/T 17626.2—1998(等同 IEC 61000-4-2:1995)。另外两个试验项目“电缆充电脉冲抗扰度试验”与“传导型抗扰度试验”采用该标准独有的试验方法,无相关的工业基础标准支持,也就找不到相应的标准试验设备,这导致实验不可操作。与 RG1.180 相比,所列的 6 个试验项目还不能全面反映核电厂的电磁环境条件。

## 3 核电厂典型设备电磁兼容测试

2006 年 6 月,中科华核电技术研究院北京分院用大亚湾核电厂反应堆保护系统所用的集中控制模拟量机柜(KRG)的电源组件、9020 典型组件进行了电磁兼容摸底试验。被测设备按照大亚湾核电厂现场 KRG 机柜的实际接线方式进行布线,按照原厂组件复制了 10 种 BAILEY 9020 典型组件,试验所用的机箱、机柜采取自主开发设计,结构、材料与现场一致。按照美国 NRC RG1.180—2003 的规定,做了电磁兼容试验,电磁兼容共进行了 4 项试验。1) 电源耦合干扰试验:尖峰脉冲幅度 400 V,上升前沿  $t_1 \leq 1 \mu$ s,脉冲宽度  $t_2 \leq 10 \mu$ s。2) 静电放电抗扰度试验:放电试验电压(峰值)2 kV。3) 射频电磁场辐射抗扰度试验:试验场强 1 V/m,扫描频率 80 MHz~1 GHz。4) 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验:试验电压 1 V(120 dB $\mu$ V),扫描频率 150 kHz~80 MHz。所做的试验项目基本涵盖 NRC RG1.180 的内容,试验等级从高到低,逐项测试。

试验测试结果表明:所有试验样本在试验前、后性能符合技术规范书要求,除 FE7C21 板件在射频场感应的传导骚扰抗扰度试验中不符

合验收指标外,其余在试验中测试均符合要求;在役核电厂的反应堆保护系统电源不能在标准规定的测试条件下正常工作(采取电源滤波与保护措施后可正常工作);按现役保护系统插件复制的组件能通过部分电磁干扰测试,但对某些条件不能通过(如组合波测试)。对于试验等级较低的试验,组件表现出一定的抗干扰能力,移动电话频段干扰对组件的性能和功能未发现有影响。对于试验等级较高的试验,插件(包括9020电源)不能承受强干扰。

以上试验说明,根据NRC RG1.180 导则,大亚湾核电厂现有反应堆安全保护系统存有潜在不安全因素,特别是电源,其影响面很大。

#### 4 应对策略

我国《核动力厂设计安全规定》(HAF 102,以下简称《规定》)对核动力厂安全重要仪表和控制系统提出了必须满足的最低要求。根据《规定》,核动力厂仪表和控制系统以及设备(包括相关电缆)的设计和安装应使其能承受核动力厂的电磁环境,在设计中应对接地、屏蔽和干扰的去耦采取适当措施。安装和维护的实际操作应足以保证这些措施在安装和维护时得到适当实施。

核电站原有的仪控设备正普遍地被基于计算机技术的数字化仪控系统或先进的模拟系统所替代,应根据核电厂实际的电磁环境条件明确对这些数字或先进模拟系统的电磁兼容要求。建议制定适宜可行的核电厂安全重要仪控系统电磁兼容设计与鉴定导则,导则应与相应的基础工业标准一致。

针对新建电站,需确定系统设计基准工况时的电磁环境,在此基础上对系统设备进行EMC设计、鉴定及全寿命维持合格鉴定状态。

下述标准可提供设计指导:1) IEEE Std 1050—2004 发电厂仪表和控制设备接地导则;2) RCC-E(2005版)安装核岛电气设备设计和建造规则D卷。

下述文件可对鉴定试验提供指导:1) NRC RG 1.180(2003)评估电磁和射频干扰对安全相关仪控系统影响指南;2) EPRI TR-102323 Ver3(2004)发电厂设备电磁干扰试验导则。

针对在役电站,应对系统重新进行EMC评估,根据上述设计指导文件,对系统进行改进

或采取适当的补救措施,确保系统在所有可能的电磁环境条件下均能完成其预定功能,必要时可进行再鉴定。

#### 参考文献:

- [1] 关建军. 大亚湾核电站微电子系统的防雷保护[J]. 广东电力, 2003(4):34-49.
- [2] HAGEN E W, GEHL A C. Aging assessment of reactor instrumentation and protection system components, NUREG/CR-5700[R]. US: NRC, 1992.
- [3] KORSAH K, CLARK R L, WOOD R T. Functional issues and environmental qualification of digital protection systems of advanced light-water nuclear reactors, NUREG/CR-5904 [R]. US: NRC, 1994.
- [4] HASSAN M, VESELY W E. Digital I&C systems in nuclear power plants: Risk screening of environmental stressors and a comparison of hardware unavailability with an existing analog system, NUREG/CR-6579 [R]. US: NRC, 1997.
- [5] Regulatory guide 1.180 guidelines for evaluating electromagnetic and radio-frequency interference in safety-related instrumentation and control systems[S]. US: NRC, 2000.
- [6] Regulatory guide 1.180 revision 1, guidelines for evaluating electromagnetic and radio frequency interference in safety-related instrumentation and control systems[S]. US: NRC, 2003.
- [7] KERCEL S W, MOORE M R, BLAKEMAN E D, et al. Survey of ambient electromagnetic and radio frequency interference levels in nuclear power plants, NUREG/CR-6436 [R]. US: NRC, 1996.
- [8] 宋顺子, 黄寅九, 朴源奭. 核电厂电磁兼容性的检测方法及其实测结果的比较[C]//全国第五届核仪器及其应用学术会议论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2005.
- [9] Guidelines for electromagnetic interference testing in power plants, EPRI TR-102323 VER3 [R]. US: EPRI, 2004.
- [10] IEEE STD-323—2003 standard for qualifying class 1e equipment for nuclear power generating stations[S]. New York: IEEE, 2003.
- [11] GB/T 11684—2003 核仪器电磁环境条件与试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2003.