

国内核电厂设备安全分级方法研究

田苗

中核投资有限公司

DOI:10.12238/jpm.v4i2.5641

[摘要] 根据核电厂设计安全规定,在核电厂设计时,必须确定属于安全重要物项的所有构筑物、系统和部件,包括仪表和控制系统,然后根据其安全功能和安全重要性分级。一个逻辑清晰的安全分级方法对于完成物项分级是非常重要的,目前对于具体分级的方法尚未有统一的要求,本文从国内核电厂安全功能设计、分配、实现过程及事故分析与安全分级关系的角度出发,形成了一套系统的用于核电厂的安全分级方法。

[关键词] 安全分级;功能设计;事故分析

Research on the safety classification method of domestic nuclear power plant equipment

Tian Miao

China National Nuclear Investment Co., Ltd., Beijing

[Abstract] According to the "safety regulations of nuclear power plant design", all structures, systems and components, including instruments and control systems of safety items must be determined in the design of nuclear power plant, and then classified according to their safety function and safety importance. A logical clear the safety classification method is very important to complete item classification, currently for the specific classification method has not yet unified requirements, this paper from the domestic nuclear power plant safety function design, distribution, implementation process and accident analysis and the perspective of safety classification relationship, formed a system for nuclear power plant safety classification method.

[Key words] safety classification; functional design; accident analysis

引言

核能因其安全、清洁、高效的特性,有利于保护生态环境,是优化调整我国能源结构、推进绿色低碳可持续发展,实现碳达峰、碳中和的必然选择。同时对带动高端装备制造业、促进科技创新具有重要意义。但我国核电事业快速稳步发展的形势也对质量和安全提出了更高的要求。

核电厂作为利用核能产生电能的发电站,共历经厂址选择、开发设计、施工建设、调试、运营、退役以及废料处理七个关键环节,涉及众多复杂且对核电厂安全有重要影响的系统、设备。因此,保证核安全目标的实现须基于核电厂系统和设备的质量、可靠性适应的规定,根据其所承担的核安全功能的重要性、对内部和外部事件不同程度的敏感性,对构成系统的设备进行安全级别划分。不同安全级别对设备本身的要求差别巨大,所以合理的安全级别划分对有效保障核电厂安全稳定运行至关重要。^[1]

划分安全级别旨在提供分级设计标准,对于核电厂不同安全等级的物项(主要指设备)规定不同的设计、制造、检验和试验要求^[2]。《HAF 102-2004 核动力厂设计安全规定》^[3]中明

确规定,在核动力厂设计时,必须首先确定属于安全重要物项的所有构筑物、系统和部件,包括仪表和控制软件,然后根据其安全功能和安全重要性分级。它们的设计、建和维修必须使其质量和可靠性与这种分级相适应。

安全分级是一个系统工程,与核电厂的设计密不可分,所有安全物项(主要指设备)均需要确定合理、可靠的安全级别,以指导、配合核电厂设计工作,而核电厂物项设计复杂,数量大,种类多,不可能靠少数人完成全部的分级工作,在这一点上,新堆型的设计体现的更加明显,例如高温气冷堆全陶瓷球形燃料元件、多头螺旋管式蒸汽发生器等设备涉及的安全功能都明显区别于常规的压水堆,不同的安全功能也意味着需要不同的安全体系。

同时,分级工作伴随整个核电厂设计过程,甚至在已运行核电厂的改造中仍存在对设备进行分级的工作,为此,必须制定一个概念清晰、逻辑性缜密、同时又具有很强的可操作性的分级方法和体系指导分级工作,保证核电厂系统、设备的分级是在同一个统一的标准体制下,并选用适合的标准进行设计。

鉴于我国目前多堆型核电路线的实际情况,可以针对同一

类堆型形成一套安全分级体系,为同一类堆型设备的安全级别划分提供指导,在此基础上,再逐渐完善建立不同的适用于各类堆型的体系,最后加以整合,形成符合我国核电建设和发展的一套完整的设备安全分级体系。

1.安全分级基本原则

我国各类堆型的反应堆虽然由于其内部构造不同有着不同的安全功能,但设备安全分级的基本原则是相同的,可概括为以下三条:

(1)必要安全停堆机制:使反应堆在运行、事故工况以及事故工况后状态下都能实现安全停堆,并保持安全停堆状态;

(2)必要余热导出机制:使反应堆在停堆后(包括事故工况停堆后)余热可以从堆芯排出;

(3)必要的手段降低放射性物质释放的可能性,并且确保其释放满足规定要求;

三条原则分别从反应性控制(安全停堆)、余热导出和包容放射性物质论述了反应堆的安全性,是指导核电厂安全的基本出发点,也是确定核电厂(主要指设备)安全分级的指导思想^[4]。

2.安全分级方法

2.1 安全分级需要考虑的因素

根据《HAF 102-2004 核动力厂设计安全规定》^[3]的要求,确定构筑物、系统和部件安全重要性的方法必须主要基于确定论方法,适当时辅以概率论方法和工程判断,同时考虑以下因素:

- (1)该物项要执行的安全功能;
- (2)未能执行其功能的后果;
- (3)需要该物项执行某一安全功能的可能性;
- (4)假设始发事件后需要该物项投入运行或持续运行的时间。

不同级别的构筑物、系统和部件之间必须配置有合适的接口设计,以确保划分为较低级别的系统内发生的任何故障不会蔓延、影响到划分为较高级别的系统。

2.2 核电厂功能设计过程和安全分级的关系

核电厂的功能设计依托安全分级,两者密不可分,设备安全分级工作贯穿整个设计过程,包括改造工作,开展设计前首先需要先对所有的安全重要设备进行合理的安全级别划分。

全面梳理、深刻剖析安全分级与核电厂功能设计过程的关联,制订一个逻辑严谨、理论依据强,且具备较高可操作性、应用性广泛的安全分级方法以指导、规范设备安全分级,确保核电厂系统设备的安全分级在同一个统一的标准体制下进行,以实现可以设置多层次的功能来满足核电厂纵深防御的基本原则要求。

安全、有效发电和保护公众免受辐射危害是核电厂运行的基本目标,其可分解成三大基本功能,即控制反应性、排出堆芯热量、包容放射性物质,大部分相关法规规范中,这三项基

本功能是指导安全分级的核心思想^[5],上述安全分级的三条基本原则也是依据该基本功能。

核电厂功能设计的通常做法是在设计中确定具体的堆型后,进行如下工作:

- (1)分解基本安全功能到各个具体的安全功能;
- (2)将具体的安全功能分配给各个系统执行;
- (3)通过系统中各个具体的设备动作来实现功能。

以上这种将安全功能分配给系统执行,进而确定系统安全功能,并确定具体执行系统安全功能的设备的过程,实际就是识别安全重要物项的过程。

在核电厂功能设计过程中,因为需要考虑设备可靠性问题,所以必须识别设备执行功能的重要性,对功能按其重要程度进行分级,进而对执行功能的系统、设备进行分级,从而使系统、设备的设计、制造与其重要程度相符,能够按照设计要求完成其所承担的功能,所以,安全分级过程与整个电厂功能设计过程是紧密相连的。安全分级是根据分级原则对系统设备所实现的安全功能进行分级产生结果,同时也作用并影响系统设备的设计。

2.3 安全分级方法

安全分级工作首先对电厂设计有一个全面的了解,包括核电厂特性、运行模式、生产制造工程清单及其可能发生的频率、预防和缓解功能清单等。然后通过安全分析(包括对始发事件的分析),了解明确以下事项:

- (1)主要事故原因、缓解过程,以及最后结果;
- (2)安全功能实现的过程。

基于以上两点,系统、完整地识别所有核电厂运行状态(包括正常运行状态中的各种机组运行模式)下的需要执行的安全功能,然后根据安全分析结果,根据安全功能对安全目标实现的重要性进行安全功能分类,再根据物项在安全功能实现过程中的重要性,对其进行分级。核电厂安全分级的方法如下:

- (1)确定设计基准,包括核电厂堆型(如压水堆、重水堆、快堆或高温气冷堆)、主要运行特性(系统总体结构)、生产制造工程清单及其可能发生的频率;
- (2)根据事故分析和总体设计确定每个PIE的预防和缓解功能及其支持功能,形成功能清单;
- (3)根据法规标准要求确定分级原则;
- (4)根据分级原则确定每个功能的安全级别;
- (5)根据安全级别和系统完成的功能,确定系统的安全级别和设计要求;
- (6)根据分级原则确定系统内具体设备的安全级别和设计要求;
- (7)对分级结果进行优化改进,必要时重复补充步骤4-7;
- (8)形成最终分级结果^[6]。

若是物项分级的结果未能满足确定论或概率论的安全分析要求,或是分级清单不完整,则必须重新核实或调整物项的设计和分级,直到清单完整并满足确定论和概率论安全分析要

求。

在核电厂的初步设计阶段就确定所有功能的细节相对比较困难,核电厂的特性也因此无法完全确定。基于此,功能确定和分级应该贯穿整个设计阶段,不仅持续开展,更应反复进行,才能确保设计的可靠性。对于功能分级初步划分不明确的地方,应及时进行备注,在完成安全分析和操作规程后应改进修订分类,形成最终清单。

2.4 功能分级过程

对于核电厂安全功能的分级应根据安全分析报告所提供的各种事故分析,然后列出各事故主要进程,确认核电厂达到可控状态、安全停堆状态或最终状态的分界点。考虑核电厂达到这些状态时间区间内所要求实现的核电厂功能,最后依据分级原则对核电厂安全功能进行分级。

同一核电厂安全功能可能在某一事故不同阶段或不同事故的不同阶段执行,对这种情况核电厂安全功能的最终级别应取最高级别。

2.5 系统分级过程

确定系统的安全分级,首先要选定与系统功能相关的事故工况,若经过判定发现没有与系统功能相关的事故工况,则根据该功能的应用范围及失效后果按照分级原则对这些非事故后处理相关的功能进行分级;若有与系统功能相关的事故工况,选定事故工况后列出各事故进程;然后进行事故工况功能分析,识别核电厂达到可控状态、安全停堆状态或最终状态的分界点,确认所分析的系统功能在事故序列的哪一阶段投入使用;再根据安全功能分级原则对系统功能进行分级,确定在该工况下系统功能的级别。如此分析该功能需要投入的所有事故工况,选取对系统功能要求最高的安全功能级别作为系统该功能的安全级别。

用此方法确定系统执行的所有功能的安全级别,系统的安全级别取决于执行的功能中最高的安全级别。

在判断过程中若已判断出系统的执行的某一功能为最高安全级别,则不用再判断其他功能。

2.6 设备分级过程

首先确定系统安全功能和安全级别,然后根据对应的安全级别的要求进行详细的系统设计,确定系统的运行过程和设备的控制过程,进而根据这些信号和产生的控制过程所执行的系统功能的级别,最后确定设备分级。

判定设备的安全分级,首先要判断设备执行的功能是否已

在系统分级过程判断过,若已判断过,则不用再判断,安全级别与在系统分级过程中得到的结果一致;若未进行过判断,则先选定与设备功能相关的事故工况,若没有该功能相关的事故工况,则根据该功能的应用范围及失效后果按照分级原则对这些非事故后处理相关的功能进行分级;若有与系统功能相关的事故工况,选定事故工况后进行事故工况功能分析,确认所分析的设备功能在事故序列的哪一阶段投入使用;再根据功能分级原则对设备功能进行分级。如此分析该功能需要投入的所有事故工况,选取对设备功能要求最高的安全功能级别作为设备该功能的级别。

用此方法确定设备执行的所有功能的安全级别,设备的安全级别取决于执行的功能中最高的安全级别。

在判断过程中若已判断出设备执行的某一功能与系统分级一致,不用再判断其他功能,该设备级别与系统分级一致。

3. 结论

安全分级是核电厂设计的基本任务,而物项的分级取决于其所执行的安全功能和重要性,本文提出了一套系统的核电厂的安全分级方法及分级步骤,把安全分级与电厂功能设计、事故分析相结合,从系统功能角度出发,结合系统对电站的影响逐步确定系统安全分级。

对于新建、在建或已运行核电站,或者由于设计改进(特别是安全相关的改进)等新增的系统和设备,特别对于我集团及公司推广的具有第四代核电特征的高温气冷堆,也可参考该方法,并结合高温气冷堆自身设计,来确定相关的系统功能分级,指导系统和设备设计。

[参考文献]

- [1]苏子威, 王晓江, 唐兴贵等. 基于 R C C 的国内核电厂设备安全分级研[J]. 核安全, 2015, 14(4): 70-75
- [2]许洪舟, 高冬. 核电站物项的安全分级[J]. 能源技术, 2007, 1: 38-39
- [3]国家核安全局. HAF 102 核电厂设计安全规定[S]. 2004.HAF102-2004:2004,《核动力厂设计安全规定》[S]
- [4]段黎明, 马小强. 中美两国反应堆物项安全分级比较[J]. 中国高新技术企业, 2013(34): 29-30
- [5]竺艺, 张圣. 国内核电厂设备的安全分级研究[J]. 中国设备工程, 2012, 9: 24-26
- [6]沈伟. 浅述核安全机械设备安全分级. 核安全, 2010 (1): 42-45