

新形势下核电厂应急电源系统风险防控与配置

彭元凯 丁瑞荣

大亚湾核电运营管理有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21065

[摘要] 新形势下,由于极端气候影响、技术更新换代、法规要求变化及运行工况复杂化,对核电厂应急电源系统的可靠性、冗余性和风险防控提出了更高要求。针对新形势下核电厂应急电源系统主要挑战及风险特征,研究其风险防控与配置优化的应用价值,剖析现阶段核电厂应急电源系统在配置、防控、运维等方面存在的突出问题,并针对性地提出优化策略,为核电厂应急电源系统的稳定、安全运行提供理论支撑和实践参考,助力核电厂安全高效发展、可持续发展。

[关键词] 核电厂; 应急电源系统; 风险防控; 配置策略; 极端工况

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Risk Prevention, Control, and Configuration of Emergency Power Supply Systems in Nuclear Power Plants under New Circumstances

Yuankai Peng Ruirong Ding

Daya Bay Nuclear Power Operation and Management Co., Ltd.

[Abstract] As a result of the new conditions, like extreme weather conditions, advancements in technology, changes to regulations and increased sophistication of operational problems, higher demands on reliability and redundancy as well as risk control mechanisms within the context of emergency power systems used at nuclear power stations have been set up. The paper discusses its main issues and characteristics concerning this kind of system: evaluating the value of solutions reducing risks through optimisation of configurations; determining essential issues about contemporary designs of emergency power systems (risk mitigation techniques and operation maintenance plans) along with certain actions required by them are indicated. Conclusions provide both theoretical basis and practical approach so that emergency electricity supply networks in nuclear reactors operate safely, effectively, and dependably –another drive behind safer, more effective, and sustainable operation of those networks.

[Key words] Nuclear power plant; Emergency power supply system; Risk prevention and control; Configuration strategy; Extreme operating conditions

引言

核电厂安全稳定运行事关公众生命财产安全及生态环境安全,应急电源系统作为核电厂纵深防御体系的重要组成部分,必须在全厂断电、极端自然灾害、设备故障等事故发生时立即启动并提供稳定的电力供应,保证反应堆停堆、余热排出、安全壳完整性等功能的实现。随着全球能源结构转变,核电厂运行环境日益复杂,极端天气事件频发、超设计基准事故风险凸显、法规标准不断更新,传统应急电源系统配置方式和风险防控措施已经无法适应新形势下安全需求,部分核电厂存在应急电源配置不足、风险防控落后、运维管理缺乏等问题,埋下了安全隐患。因此,对新形势下核电厂应急电源系统风险防控和配置策略进行深入研究,解决现存问题,提高系统可靠性以及应急能力,对

于保障核电厂安全和推动核电产业高质量发展具有重要的现实意义。

1 新形势下核电厂应急电源系统的主要挑战及风险特点

新形势下,核电厂应急电源系统的运行环境、技术要求和安全需求发生了较大变化,其风险特征呈现多元化、复杂化、突发性等特点,主要挑战表现在以下3个方面。从外部环境角度考虑,极端天气(如超强台风、暴雨、高温、严寒、地震等)频发,对户外布置的应急电源设备产生很大影响,容易造成设备受损、线路故障,给系统正常启动和运行带来极大风险;同时,由于电网波动及外部供电中断的概率增大,给应急电源系统的应急保障功能带来很大压力。从技术要求的角度分析,随着机组改造、安全

系统智能化等升级要求,对配套应急电源容量、速度、兼容等技术要求越来越高,传统的应急电源系统存在较大技术瓶颈,不能满足智能化和精细化的运行要求。从安全管理来看,超设计基准事故的风险概率在加大,应急电源需要应对突如其来的极端状况,而传统系统冗余不足,易出现共因故障,导致系统失效^[1]。

相应地,其风险特性主要体现为:(1)风险的关联性。由于应急电源系统的设备、线路、运维等任一风险均可能导致整个系统崩溃,并影响核电厂安全系统的正常运行;(2)风险的隐蔽性。因为应急电源系统平时处于备用状态,其部分故障(如设备老化和线路腐蚀)很难发现,一旦遇到工况而启动时,可能发生启动失败和不能保证稳定供电的现象;(3)风险的危害性。当应急电源系统失效时将导致反应堆余热不能排出、安全系统无法启动,进而可能造成核泄漏重大事故的发生,给人身及环境带来巨大损害。

2 核电厂应急电源系统风险防范和配置优化的应用价值

核电厂应急电源系统的风险防控与配置优化作为提高核安全水平,保障机组稳定运行的有效措施,具有十分重要的应用价值,主要体现在以下两个方面。

2.1 提高极端工况下电源可靠性,保障核安全最后一道防线

极端工况下的应急电源系统作为核电站唯一的电源,其可靠性对核安全防线有着决定性作用,通过有效的风险预防与配置优化,提高了应急电源系统的启动成功率和供电稳定性,在突发状况下能够及时响应、持续供电,保证了反应堆停堆、余热排出、安全壳密封等功能实现,防止核泄漏等重大事故发生,有效保障了核安全最后一道防线。

2.2 合理配置,降低共因失效及全厂断电的概率

由于传统的应急电源的配置方式比较单一、冗余度低,造成较大的共因故障的可能性以及全厂断电风险。采用合理的配置方式,使用不同的冗余的手段作为应急电源,有效降低了共因故障的概率,采取主电源加备用电源加应急电源的多重供电措施;同时,通过完善风险控制的方法,对潜在的风险进行排查,使得设备发生故障的概率减小,进一步降低了全厂断电的风险,从而提高了核电厂运行的安全性与稳定性,并且减少了由于事故停机带来的经济损失。

3 核电厂应急电源系统风险预防及配置存在的问题

根据当前核电厂中应急电源系统运行的现状来看,多数的核电厂已配备了应急电源系统,但在新形势下应急电源系统的风险防控与配置方面出现了很多问题,主要体现在应急电源系统的配置、防控以及运维等方面,无法满足安全发展的需要。

3.1 形式比较单一,没有采用多样化、冗余的设计

很多核电站的应急电源以固定的柴油发电机为主,形式单一,没有多样化的备用措施。同时设计上不够冗余,部分重要的应急电源设备“一用一备”或没有备用,在主用设备故障时,备

用设备不能立即替代运行,造成应急电源系统的失效;另外,应急电源容量配置不合理,部分机组存在容量富余,造成浪费,或者容量不足,难以满足极端情况下的要求^[2]。

3.2 风险防范措施相对落后,不能应对超设计基准事件

目前,核电厂应急电源系统的风险防范仍停留在定期检查和故障维修上,措施比较落后、被动,缺乏主动的风险防范和动态监控。对超设计基准事件如极端地震、强台风加电网事故等防范不足,没有采取专门的防范措施,应急电源系统适应极端情况的能力弱;同时风险防范与概率安全评价结合不紧密,不能准确定位风险,防范措施针对性不强、有效性差。

3.3 缺乏运维管理和老化评估,长期可靠性得不到保障

应急电源系统运维管理不到位,一些核电站未建立完善的应急电源系统运维管理制度,缺乏必要的巡查、保养等,造成设备老化以及电线电缆腐蚀等问题不能有效发现并解决;而且缺乏完备的老化评价方法,无合理、有效老化检测与评价办法,无法正确判断应急电源设备的老化程度及其使用寿命,造成严重老化设备仍在运行的现象,增加系统出现故障的概率;另外运维人员技术水平较低,不能有效应对突发性故障,降低了系统的持续稳定性^[3]。

4 核电厂应急电源系统风险防范与配置优化措施

为了应对目前核电厂应急电源系统风险防范以及配置上所存在的问题,在新的形势下更好地保障核电厂应急电源系统安全性,根据相关法律法规要求,从极端角度出发,加强运行维护工作,从而提升核电厂应急电源系统可靠性及风险防控水平。

4.1 依据法规标准,构建分级分区的应急电源配置系统

在保证遵守核安全相关法律法规和标准条件下,依据核电站规模、运行工况、安全性等因素制定分层次、分区域的应急电源配置方案。根据不同等级的安全重要性对场地进行分区,选择并安装相应规格与类型的应急电源设备;增加额外的冗余度,在传统的“主用+备用”的基础上增加一个层次的“应急备用”,避免发生单点故障导致的共因失效并且当一台设备发生故障时仍然能够工作;同时合理计算应急电源容量,在考虑最坏的情况下所必需的电力负荷基础上安排应急电源容量以避免资源浪费或短缺;最后确定分级、分区的原则。对于核安全设备(例如:反应堆冷却系统、安全壳喷淋等)其电源应当有最高的三级冗余并且在物理上是分离的,以防止由于火灾或者水灾造成它们一起失效。非安全级中对运行的安全稳定有重大影响的负荷,根据区域的风险等级采取相应的层次的应急电源。三层的冗余中第二层“备用”与第三层“应急备用”应为不同类型的电源(如固定应急柴油机与移动式的柴油发电机组)或不同变电站引接线以达到真正意义上的多样。容量大小除了考虑正常停堆所需的功率外,还应考虑可能出现的极端情况下的暂时性的通风、排水、照明和监测设备同时动作所需功率,并留有一定的裕度。通过仿真及事故工况演习反复校验,得出按需分层、分区配给、层层多余、准确定容的原则,避免过多的投资造成的浪费,也防止因不足而带来的危险。

4.2 关注极端情景, 提出移动式应急电源和多种类的应急电源

针对极端气候、超设计基准事故等情景, 改变传统的固定应急电源的局限, 引入了移动式应急电源, 如: 移动式柴油发电机组、应急储能系统等, 增加了应急电源系统的灵活性, 提高了应急处置的能力, 在固定应急电源设备发生损毁时, 可迅速使用移动式的应急电源替代; 此外, 增加应急电源种类, 结合核电站具体情况, 提出燃气发电机、电池等不同种类的应急电源措施, 形成多种类互补的应急电源体系, 提高应急电源在极端情景下适应能力和可靠性。另外, 可以采取移动应急电源统一调度与快速接入机制, 例如事先预留统一的快速插接接口或现场快速插接手段, 缩短应急响应时间。并且根据不同的厂址条件(如沿海、台风地区或内陆洪水区), 储存防水、防震、耐高温等适应性加固措施的模块化移动应急电源。通过定期演练及维护确保其可用。形成固定+移动, 传统+新型的多层次、多冗余的应急供电网络, 在部分固定应急设备损坏的情况下, 整个应急电源体系仍然能够稳定地为关键负荷供电, 从根本上提高了核电站在极端情况下的纵深防御能力和缓解事故的能力。

4.3 加强动态监测, 建立概率安全评价风险防控机制

构建应急电源系统动态监测平台, 监测运行状态、线路状态和供电数据等, 实时监测发现设备老化、线路故障等隐患, 主动预防并提前处置潜在风险; 采用概率安全评价方法, 对应急电源系统的风险点进行识别, 对其风险值大小进行评价, 制定针对性的风险防范措施, 提升风险防范的针对性与有效性; 对超设计基准事故进行专门风险评估, 并针对此类情况制定应急预案, 通过开展应急演练等方式提高应对极端状况能力。除此之外, 健全运维及老化评估制度, 编制运维管理制度, 明确巡检要求, 加强运维人员的专业技能培训, 提高应急反应速度; 建立和完善设备的老化进程监测和评估制度, 定期对应急电源设备进行老化检测, 准确判断设备使用寿命, 及时更换老化设备, 保证系统的持续可靠运行。为此, 还需要进一步融合智能化传感器技术和大数据分析技术, 形成应急管理电源系统的整个生命周期的数字孪生体, 对其进行工作状态、线路参数以及供电质量的实时监控并进行仿真模拟。根据概率安全分析结果, 建立风险矩阵和警戒线告警机制并且可以自动启动不同级别的处理程序。对于超出设计基

准事件, 需要定期更新场景库的内容, 在实际操作中检验应急预案的有效性并通过演练的数据反过来改进监视模型和老化评估的方法。此外, 将运维管理工作以及老化评估纳入信息系统当中, 实现巡视、检修和寿命预测的一体化管理。建立健全人员培训和评价机制, 通过故障演练和应急演练来培养工作人员的风险意识以及应急处置的能力, 使整个系统的风险识别、告警和应对都能很好地连接起来, 从而增强系统的韧性并提高在极端条件下的供电保障能力。场内、场外应急组织, 为了更好地提升应急能力, 尤其是相互之间的协作能力, 按照相同的演习情形由相关的应急组织参与演习^[4]。

5 结论

新的形势下, 极端工况、法规标准的更新以及技术进步对核电厂应急电源系统风险防控与配置提出更高的要求。应急电源系统是核安全的最后屏障, 其可靠性直接关系到核电厂的安全运行和公众的生命及财产安全。目前核电厂应急电源系统配置模式、风险控制、运维等方面仍存在诸多不足, 影响了应急电源系统可靠性的提升。通过建立分级分区的配置体系、采用多样化备用电源措施、形成动态的风险控制体系、完善维护和老化评估等可以很好地解决现存问题, 提高应急电源系统的可靠性、冗余性和应急响应能力, 保障核安全。未来还需结合核电技术的发展以及核安全需求的提升不断优化应急电源系统的风险控制与配置, 促使应急电源系统朝着智能化、精细化和多元化发展, 为核电厂高质量安全稳定运行提供保障。

[参考文献]

- [1]王波.核电厂应急电源系统的电气保护分析[J].电工技术,2020,(15):147-149+152.
- [2]李锐刚.核电厂失去正常运行厂用电源试验介绍[J].产业与科技论坛,2018,17(19):73-74.
- [3]张庆丁,高建喜.某核电厂施工用电系统供电模式改造方案浅析[J].科技视界,2017,(04):271-272.
- [4]蔡晶慧,冉慧敏.应对先进核电厂纵深防御要求的电气系统配置方案与优化研究[J].中国设备工程,2023,(06):79-81.

作者简介:

彭元凯(1984--),男,汉族,山东省菏泽市人,工程师,大学本科,核电厂核安全管理。