

核电厂SBO应急柴油发电机组方案设计与应用

根据日本福岛事故后经验反馈，多堆核电厂必须具备全面应对全厂断电的能力，并在全厂断电期间保证堆芯充分冷却和安全壳完整性。针对我国核电厂应急柴油发电机组配置现状进行了分析，从加强核电厂严重事故缓解能力的角度，提出了全厂断电（Station Black Out, SBO）应急柴油发电机组的设计方案，并应用于新建核电项目，进一步完善了核电厂应急电源纵深防御体系和事故应对策略。

孔凡何 阮 阳/中广核工程有限公司设计院

0 引言

自日本福岛事故的发生以后，核安全又一次成为大众瞩目的焦点，我国随即针对全国范围内所有在建和在运机组开展了核设施安全综合检查工作，并对核安全提出了更高的要求 and 期望。本文从福岛事故后经验反馈和核电厂严重事故缓解的角度，针对我国核电厂应急电源系统现有配置特点，提出了全厂断电（SBO）电源的设计改进方案，以期建立更为完善的核电厂应急电源纵深防御体系来满足新形势下的核安全需要。

1 核电厂应急柴油发电机组配置及改进建议

1.1 核电厂应急柴油发电机组配置说明

核电厂应急电源系统主要包括应急柴油发电机组和附加后备柴油发电机组两个部分，如图1所示。应急柴油发电机组是核电厂内独立的应急电源，每个核电机组包含两列应急电源系统，每列配置一台，容量约为6 000 kW。当厂用工

作电源和厂外备用电源失去时，任何一台柴油发电机组可以为应急厂用设备提供电能，以确保核电站的安全停堆和人员、环境的安全，以及防止主要设备损坏。应急柴油发电机组主要应对下面三种设计基准工况：失去外部电源、失去外部电源迭加安注及失去外部电源迭加安注迭加安全壳超高压。此外，一个厂址还配置一台附加后备柴油发电机组，设备容量与应急柴油发电机组一致，用于在应急柴油发电机组不可用时替代其功能，该机组若在两台应急柴油发电机组不可用后才开始切换到6.6 kV应急母线的操作，需要2~3 h的时间完成切换操作，且厂址共用一台，一次只能服务一个核电机组。

除应急电源外，核电厂每个机组还配设一台380 V的SBO柴油发电机组（200 kW），在正常或设计基准事故工况下，该柴油发电机组系统处于备用

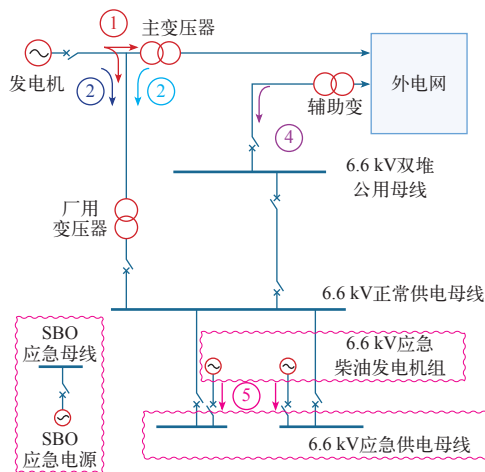


图1 在建某核电厂供电策略图



孔凡何/工程师

关键词/Keywords

核电厂·
应急供电·
SBO应急柴油发电机组·

状态,不执行安全功能。在一台机组的两列应急供电母线不能供电的超设计基准工况下,该机组给水压试验泵及必要的仪表供电,确保主泵密封和必要的仪控监测系统正常工作。

1.2 福岛事故经验反馈及改进建议

根据福岛核事故的经验和教训,针对国内主要核电厂进行全面事故推演进程,提出了以下四种SBO条件下所应对的工况:SBO迭加辅助汽动给水泵(ASG)失效、SBO迭加小LOCA、SBO迭加辅助汽动给水泵(ASG)失效并丧失最终热阱及SBO迭加小LOCA并丧失最终热阱。通过事故进程分析,当出现上述四种工况时,起动的设备主要有:电动辅助给水泵、重要厂用水泵、设备冷却水泵、余热排出泵和安全壳喷淋泵等,这些设备的供电要求超出了原380 V SBO柴油发电机组的供电能力。

厂址附加柴油发电机组为厂址共用,无法满足多机组同时发生SBO工况时的电源容量需求,且接入时间也无法满足要求。因此,较为有效的解决办法是按照每个核电机组增设一台6.6 kV应急柴油发电机组,作为单元机组应急柴油发电机不可用时极端工况的补救措施。

2 核电厂SBO应急柴油发电机组设计方案

2.1 SBO应急柴油发电机组接线方案

核电厂SBO应急柴油发电机组按照每个核电机组一台进行配置,其接线有直接接入终端设备和接入6.6 kV应急母线两种方案。接线图如图2所示。

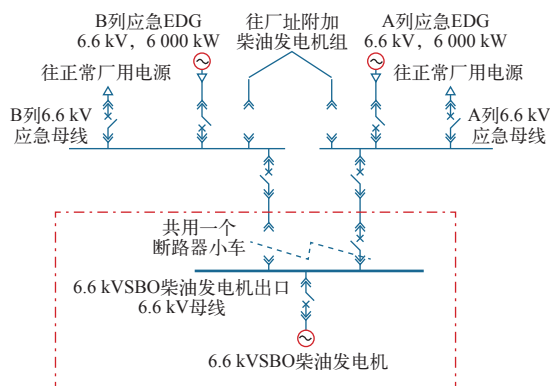


图2 核电厂SBO应急柴油发电机组接线策略图

若6.6 kV SBO柴油发电机组直接给这些设备供电,需要将大量的工艺设备的末端接线盒改为双电源切换形式,改造工作量大,涉及系统多,增加了供电系统和仪控系统的复杂性。虽然能解决两列6.6 kV应急母线失效后的供电问题,但是却损害正常运行时电厂运行的可靠性,增加电厂日常运行操作的复杂性,对安全反而不利。

由于超设计基准工况下需要起动的设备均在于原6.6 kV应急母线下,因此SBO柴油发电机组可考虑与6.6 kV应急母线相连。为防止误操作,每台机组仅配置一个断路器小车,杜绝将6.6 kV SBO柴油发电机同时并入两列6.6 kV应急母线的可能。该种方案作为SBO应急柴油发电机组接线推荐方案,避免了直接接入设备所带来的操作上的复杂性。

为确保核电厂极端事故工况下,6.6 kV SBO应急柴油发电机组顺利接入电气系统,其主要操作顺序说明如下:

- 1) 核电厂6.6 kV应急母线同时失压持续时间超20 s时自动起动,也可通过主控室手动起动。
- 2) 当其他电源恢复供电时,6.6 kV SBO柴油发电机手动停运并退出。
- 3) 6.6 kV应急母线的几路电源切换时,禁止接入多个电源回路,并需采用电气联锁实现上述闭锁要求。

2.3 负荷加载

由福岛事故经验反馈可知,本文中6.6 kV SBO柴油发电机组应对的四种超设计基准工况是对核电厂状态的一种判断,这些事故有一个缓慢发展的过程,具体发生了哪一种工况需要操作员综合电厂各个工艺系统的状态综合分析判断。因此,在事故的第一时间,核电厂操作员并不能立刻判断出电厂发生了哪种事故,为确保核电厂安全设施的有效运转,需在1 h内完成所有加载设备的带电要求。

此外,在加载四种工况负荷时,若将两列6.6 kV应急母线上的负荷全部卸载,会较大范围增加仪控系统的卸载信号,同时也提升了仪控系统复杂

性，因此需要对应急柴油发电机组加载负荷作进一步分析。6.6 kV应急母线有少部分负荷在恢复供电后不经过仪控系统自动起动，如直流供电系统、相关暖通系统和照明系统，其中直流供电系统和照明系统是发生超设计基准工况时需要起动的设备，暖通系统用于核电厂厂房内环境控制，这类自动起动的设备可在6.6 kV SBO柴油发电机组起动成功后第一时间带载运行。

综合以上分析，6.6 kV SBO柴油发电机组负荷加载的过程如下：

- 1) 起动6.6 kV SBO柴油发电机组。
- 2) 将6.6 kV SBO柴油发电机组接入每台机组两列6.6 kV应急母线的其中任一列，此时该母线没有卸载的负荷带电，大部分设备的仪控系统没有发出起动指令，即便带电也不会起动运行，直流供电系统、相关暖通系统和照明系统加载起动。
- 3) 将四种超设计基准工况下，需要在1 h内投入运行的设备全部自动加载，然后操作员判断具体需要起动哪种工况的负荷运行。1 h的时间，操作员已经能够确认电厂发生的是哪种超设计基准事故工况。
- 4) 根据操作员的指令，手动将不需要运行的设备的开关拉开，防止误操作，然后将1 h以后才需要运行的设备加载。四种超设计基准工况1 h以后才需要运行的设备可以由仪控系统自动投入，也可以手动投入，从减小仪控系统的复杂性和规模考虑，建议采用手动投入的方式。

2.4 6.6 kV SBO柴油发电机输出电功率

根据上述对柴油发电机组加载负荷的分析，6.6 kV SBO柴油发电机功率输出电功率不能低于4 400 kW，考虑10%的裕度，柴油发电机组的电功率不低于4 900 kW为宜，具体取决于各个电厂的实际情况，例如北方厂址暖通设备较大，需相应适当增大设备容量。

2.5 主要辅助系统配置

(1) 燃油系统

每台SBO应急柴油发电机组设置一个主贮油罐，主贮油罐的设计容量应保证柴油发电机在额定功率下连续可靠地运行7天。设置两台100%容量互为备用的电动泵连续向日用油箱供油，以保证日用油箱在正常运行工况下始终是充满油的。日用油箱的设计容量应保证柴油发电机在1.1倍额定功率下运行4 h。

(2) 起动空气系统

每台SBO应急柴油发电机组设置两套独立和冗余的空气起动装置，每套起动系统都具有起动柴油机的能力。

每套起动装置能够连续独立起动柴油发电机5次。每套压缩空气系统提供一个压缩空气生产装置，压缩机容量足以在70 min内将空气储罐的空气由大气压升至40 bar。压力范围足以保证无须向空气储罐再补充气体的情况下连续5次起动柴油机，每次在10 s之内。

3 结束语

本文针对我国核电厂应急电源配置特点，对核电厂应急电源从接线方案、控制方案、负荷加载、设备容量以及辅助系统等方面提出了具体改进办法，提高了核电厂应急供电系统的安全性和供电能力，对后续核电厂应急柴油发电机组加载程序设计具有重要参考意义。

参考文献

- [1] 叶奇蓁. 从“福岛第一核电站事故”看我国核能利用的核安全[J]. 物理, 2011(7): 427-433.
- [2] 蒋莉萍. 日本核电危机及其影响初步分析[J]. 能源技术经济, 2011(4): 1-4.

(收稿日期: 2015-04-15) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告