ACP1000实物保护柴油发电机配电系统的设计

阐述了实物保护系统设置柴油发电机作为应急电源的必要性和重要性，论述了柴油发电机保安负荷的特性和确定原则，分析了采用柴油机应急电源为核电厂实物保护的一级及特别重要的保安负荷供电设计的可行性，提出了柴油发电机配电系统的结构组成和系统运行原则，总结了柴油发电机设计的功率计算、容量的选择及校验，探讨了柴油发电机设备选型思路。通过实物保护柴油发电机配电系统的研究及工程实施的结果，对实物保护系统可靠供电和运行提供了理论依据，从而满足实物保护系统安全可靠运行的要求。

曹连兵　高　硕/中国核电工程有限公司

曹连兵/高级工程师

关键词/Keywords
实物保护·
柴油发电机·
保安负荷·
应急电源·
配电系统·

1　实物保护系统的必要性

核电厂要使用核材料，若其遭破坏或被盗可能导致显著放射性物质的释放，从而直接或间接危及工作人员和公众的健康与安全。作为核材料安保的重要措施，实物保护系统可以减小核电厂内核材料遭盗窃、抢劫的概率，从而保护核材料及重要核设备的安全。目前根据核安全及核安保监管要求，实物保护系统投入运行是核材料许可证和核电厂运行许可证发放的必要条件。

2　柴油发电机作为应急电源的必要性

实物保护系统一旦发生停电，将导致核电厂安保系统的“探测、延迟和反应”失败，会造成重大的政治影响、经济损失与人身伤亡。因此，根据GB 50052—2009《供配电系统设计规范》中负荷分级供电要求，实物保护用电负荷确定为一级负荷或一级特别重要负荷，其中出入口控制、入侵报警、视频监控、通信和监测等设备为特别重要负荷。供配电系统包括：①应急电源系统，包括一回路正常供电电缆线路和提供应急电源的一台柴油发电机组；②为特别重要负荷提供可靠电源的交流不间断电源系统。

同时，核安全导则HAD 501/02《核设施实物保护（试行）》中对实物保护供配电系统有明确规定，要求其供电系统有两路电源：主电源和备用电源供电。综上所述，ACP1000实物保护电源系统的备用电源选用的是柴油发电机的低压供配电系统，可在主电源失去的情况下满足实物保护系统24 h的供电要求。

3　柴油发电机供电系统主接线方式

实物保护柴油发电机供电系统的结构如图1所示。主接线如图2所示。从图1中可看出，该系统除故障状况下柴油发电机提供的应急电源，另有一路引自核电厂机组公用负荷段的正常电源，提供该系统正常工况下的电源。实物保护系统之所以采用两路电源供电，是因为当一个电源发生故障时，另一个电源应不致同时受到损坏，以维持继续供电。一级负荷中的特别重要负荷，必须有独立于正常电源的应急电源提供专用馈电线路，柴油发电机供电系统可作为独立备用电源实现此功能。

实物保护系统在核电厂发生重大安全事故时，要独立地完成一系列安保工作，在一定时间内，需要优先保证保安

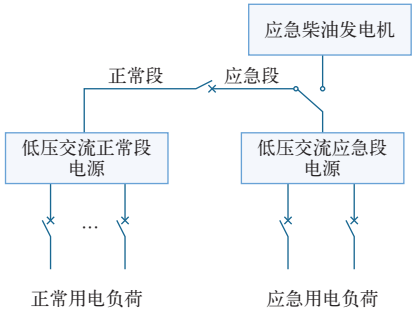

图1 实物保护柴油发电机供电系统的结构

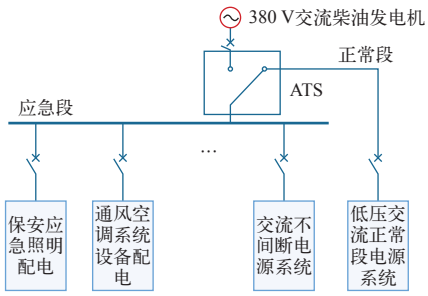

图2 实物保护柴油发电机供电系统主接线

负荷的用电需求，包括实物保护系统所需保安照明负荷用电都必须由柴油发电机提供的备用电源承担。

实物保护供电系统采用这种主接线结构的供电方式，保证了在正常电源失去，已无法保证正常供电或正常电源发生电气故障等情况下，应急柴油发电机组仍然能够保证实物保护系统的正常运行。甚至在应急电源系统起动失败的情况下，不间断电源系统（UPS）也能够为控制、报警、监控和通信设备等特别重要负荷提供一定时间内的可靠电源。

4 柴油发电机的选择

本节介绍了核电厂实物保护供电系统中柴油发电机的主要电气参数确定及设备选型，主要包括柴油发电机的负荷特性及功率确定、容量选择、输出功率复核及母线电压水平校验。

4.1 柴油发电机介绍

目前，以往复活塞式内燃发动机作为动力的柴油发电机组在需要连续可靠供电的场合得到了广泛的应用。在配置柴油发电机组时，最重要的是机组额定功率的确定，即容量的选择。过大的功率会造成运输、安装的困难和不必要的浪费，增加维护量；过小的功率又会使发电机负荷过重，降低机组可靠性和寿命，甚至在关键时刻超载停机，造成事故。因此，需要根据柴油发电机组的使用条件、供电负荷大小及种类合理选择柴油发电机组的容量。

4.2 柴油发电机的功率

柴油发电机组主要由柴油发电机和交流同步发电机两大部分组成。柴油发电机组的功率主要有持续功率、基本功率和限时运行功率 3 种。持续功率适用于对电能质量要求较高或因市电昂贵而选择柴油发电机的单位，又称为常用功率。基本功率适用于在电网中断时提供应急后备电力功率，又称为备用功率。限时运行功率指在规定的维修周期和环境条件下能够连续运行300 h、每年供电达500 h的最大功率。

4.3 柴油发电机负荷的特性及容量的选择及校验

4.3.1 柴油发电机负荷的特性及计算

备用柴油发电机组的供电对象一般是保安负荷，因而保安负荷的统计结果是选择柴油发电机组容量的依据。在统计保安负荷时，对于在时间上能错开运行的保安负荷不应全部计算，可分阶段统计同时运行的保安负荷，取其大值作为计算功率。

ACP1000实物保护供配电系统需采购的柴油发电机所带负荷运行方式为：10 kV电气厂房一线通过实物保护系统变压器、进线开关至正常段0.4 kV母线；二线通过柴油发电机、进线开关至应急段0.4 kV母线，正常段与应急段之间设有双电源转换开关（ATS）。正常运时低压ATS合在正常段电源侧，实物保护系统1台变压器带2段低压母线运行，柴油发电机组备用。柴油发电机的接入方式：由柴油发电机ATS下口（负载侧）接入实物保护系统设置在配电室的柴油机控制柜中。正常情况下，开关合在正常段电源侧，柴油发电机备用。当实物保护系统0.4 kV正常段母线故障失电后，柴油发电机自起动或值班人员手动起动。

实物保护系统应急段0.4 kV母线的负荷有：直

流充电器、双围栏应急照明、单元式空调机组、油泵和火灾自动报警系统等。

根据实物保护系统供电需求，备用柴油发电机起动后，首次加载的负荷为双围栏应急照明和油泵，共计52 kW；其他置于手动位置，需要起动时加载；考虑临时应急负荷，柴油发电机起动后投入运行的最大负荷约为257 kW。

又知

$$P_c = S_c \cos\varphi \tag{1}$$

式中，S_c为发电机组的最大计算负荷。

将$\cos\varphi = 0.85$，$P_c = 257$ kW代入式（1），得$S_c = 302$ kV·A。

4.3.2 柴油发电机容量选择

根据DL/T 5153—2014《火力发电厂厂用电设计技术规程》规定：发电机连续输出容量S_e应大于最大计算负荷S_c，即$S_e \geqslant nS_c$，当每个单元机组配置1台柴油发电机组时，$n=1$，代入上式得$S_e \geqslant 302$ kV·A。

此外，应急柴油发电机的容量还应按照满足负荷中单台最大容量电动机起动的要求进行校验。发电机带1台最大容量的电动机负荷起动时，短时过负荷能力校验如下：发电机在热状态下，能承受150%S_e，时间为15 s，即有

$$S_e \geqslant [nS_c + (1.25K_Q - K)P_{em}]/1.5 \tag{2}$$

式中，P_{em}为最大电动机的额定功率；K_Q为最大电动机的起动电流倍数，约为6；K为换算系数，取0.8。

将$S_c = 302$ kV·A，$n=1$，$K_Q = 6$，$K = 0.8$，$P_{em} = 35$ kW代入式（2），得$S_e \geqslant 357$ kV·A。

综上所述，柴油发电机的容量S_e需大于357 kV·A。

4.4 柴油发电机输出功率的复核

4.4.1 环境条件修正

P_r为标准使用条件下的输出功率，功率修正公式为

$$P_X \geqslant aP_r \tag{3}$$

式中，P_X为实际输出功率，$P_X = P_c = 257$ kW；P_r为标准使用条件下的输出功率；查表得现场环境条件修正系数为$a = 0.98$。

P_X值和a值代入式（3），可得$P_r = 262$ kW。

4.4.2 持续1 h运行状态下输出功率校验

停电1 h内，柴油发电机组要具有承担最大保安负荷的能力，一般柴油机1 h允许承受的负载能力为1.1P_X，故有

$$P_X \geqslant aP_c / 1.1\eta_G \tag{4}$$

式中，a为柴油发电机组的功率配合系数，取1.1；η_G为发电机的效率，取0.9。

将$P_c = 257$ kW代入式（4），得$P_X \geqslant 285$ kW。

4.4.3 首次加载能力校验

制造厂保证柴油发电机组首次加载能力不低于额定功率的50%。因此，要求柴油机的实际输出功率不低于初始投入的起动有功功率的2倍。

$$P_X \geqslant 2.5K_Q \sum\nolimits_{ED}^{P^x} \cos\varphi_Q \tag{5}$$

式中，$\sum_{ED}^{P^x}$为初始投入的保安负荷额定功率之和，kW；K_Q宜取 5 ；$\cos\varphi_Q$为起动负荷的功率因数，宜取0.4。

代入式（5），得$P_X \geqslant 260$ kW。

4.4.4 母线电压水平校验

当直接起动异步电动机时，由于起动电流很大且异步电动机的功率因数较低，机组输出电压显著下降，发电机的励磁系统必须进行强励磁，才能补偿机组输出电压的下降。柴油发电机组因其特性上的差别，起动空载异步电动机的容量不得超过其额定容量的70%，起动有载异步电动机的容量不得超过其额定容量的35%。按最不利情况有载起动功率最大的围栏应急照明和油泵负荷（52 kW）计算，因此柴油发电机的额定功率应满足：$P_X \geqslant 52$ kW/35%，即$P_X \geqslant 148.6$ kW。

4.4.5 柴油机容量最终的确定

由上述负荷的投运、容量的选择和柴油发电机输出功率复核可知，在满足电动机起动电流倍数K_Q为6，柴油发电机组15 s过负荷能力为1.5S_e的条件时，柴油发电机的容量应大于357 kV·A，功率应大于285 kW。

本工程选用容量为375 kV·A，额定功率300 kW，频率50 Hz的柴油发电机组。柴油发电机如图3所示。ATS双电源转换柜如图4所示。柴油发电机运

行参数如图5所示。

图3　实物保护系统柴油发电机

图4　柴油发电机ATS双电源转换柜

图5　柴油发电机起动运行显示参数

5　结束语

实物保护系统是核电厂内保护核材料和核设备的重要核安保措施。柴油发电机供电系统作为ACP1000实物保护的应急供电电源与核电厂安全保卫直接相关，目的是为了在核电厂的厂用工作电源和辅助电源都发生故障时，确保实物保护系统的保安用电设备在主电源故障时，满足工作24 h的要求。不论从柴油发电机供电系统的主接线方式，到设备选型，都在最大限度上保证了实物保护的供配电可靠性，使各种保安用电负荷能够平稳运行。在验收与实际使用中，该系统运行情况良好，供电系统各部分工作正常。在今后类似的设计中，根据用户使用情况的反馈和设计研究的深化，会改进不足，提供更加完善的设计方案。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会．供配电系统设计规范 [S]．北京：中国计划出版社，2010．

[2] 国家电力公司华东电力设计院．火力发电厂厂用电设计技术规程 [S]．北京：中国计划出版社，2014．

（收稿日期：2016－12－15）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告