

核电厂应急柴油发电机组设计要求及溯源分析

廖文兴, 阮 阳, 赵 禹, 欧小高, 宋鹏飞, 孔凡何

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要: 从设计溯源的角度, 系统梳理并深入分析了核电厂应急柴油发电机组(EDG)的设计要求及相关标准。基于应急电源系统在核电厂安全运行中的关键支撑作用, 重点从系统功能、设备主参数及性能要求等方面, 详细探讨了EDG的设计规范及其与现行法规标准的符合性。分析表明, 核电厂EDG在严格遵循安全级电源相关标准的条件下, 在容量设计、运行时间保障、起动可靠性以及综合性能要求等方面均达到了较高的安全性与可靠性水平, 能够有效保障核电厂应急工况下的电力供应。

关键词: 应急柴油发电机组; 设计要求; 溯源分析; 设备性能

Design requirements and traceability analysis of emergency diesel generator sets in nuclear power plants

LIAO Wenxing, RUAN Yang, ZHAO Yu, OU Xiaogao, SONG Pengfei, KONG Fanhe

(China General Nuclear Engineering Design Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: From the perspective of design traceability, this paper systematically combs through and deeply analyzes the design requirements and related standards of emergency diesel generator sets (EDG) in nuclear power plants. Based on the critical supporting role of emergency power systems in the safe operation of nuclear power plants, it focuses on aspects such as system functions, main parameters of equipment, and performance requirements, to thoroughly discuss the design specifications of EDG and their compliance with current regulatory standards. The analysis shows that under the condition of strictly adhering to the relevant standards for safety-class power supplies, EDG in nuclear power plants have achieved high levels of safety and reliability in terms of capacity design, operational time assurance, start-up reliability, and overall performance requirements, effectively ensuring the power supply during emergency conditions of nuclear power plants.

Keywords: emergency diesel generator sets; design requirements; traceability analysis; equipment performance

0 引言

核电厂的安全运行对于公共安全和环境保护具有至关重要的意义。应急柴油发电机组(EDG)作为核电厂的关键后备电源, 承担着在外部电源失电时为中低压核辅助设备供电

的核心功能, 以此保障反应堆安全停堆, 防止重要设备损坏, 并最终确保设备与人身安全。本文从设计溯源的角度出发, 系统梳理核电厂应急电源系统的功能要求及相关标准, 并结合华龙一号应急电源系统实例进行分析与阐述。

1 应急电源系统配置

1.1 应急电源系统功能

根据纵深防御的安全原则，核电厂的供电系统设计采用多层次、冗余配置的电源方案，以保障反应堆在任何工况下均能获得可靠电力供应。在厂外电源方面，核电厂配备500 kV和220 kV两路独立的外部电网电源，分别作为主电源和辅助电源，确保厂外电源的多样性和可靠性。在厂内电源配置方面，为应对丧失厂外电源（LOOP）事故，核岛内设有安全应急母线，并配备应急柴油发电机作为厂内应急交流电源，构成核安全级的最后一道电源保障。

在机组启动、正常运行或停堆期间，由24 kV机组母线经高压厂用变压器向10 kV厂用母线供电，从而为常规岛、核岛及辅助厂房等重要负荷提供电力。当发电机停运且其出口断路器断开时，转由500 kV主开关站通过主变压器降压后供电。若24 kV母线失电或厂用变压器不可用，则改由220 kV辅助开关站经辅助变压器向永久性设施、应急设备及公共附属系统供电。在极端情况下，即500 kV主电源和220 kV辅助电源同时丧失时，EDG将自动启动，为安全相关的应急辅助设备提供可靠电力，确保堆芯冷却和安全停堆等基本安全功能的执行。厂用电系统的接线示意图如下图所示，展示了上述多层次电源的切换与供电逻辑。

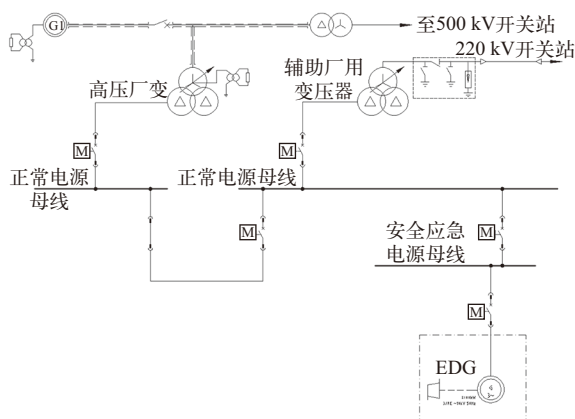


图 厂用电接线简图

Fig. Factory power wiring diagram

EDG可在核机组发生LOOP事故工况时缓解设计基准工况事故后果的影响，并且为缓解因LOOP初始事件引发的设计扩展工况复杂事故序列后果的设备提供应急电源。要求在电厂事故时能够自动启动，并按照加载程序自动加载负荷，确保在收到启动指令之后，能够在15 s内启动并达到额定电压和频率，快速恢复重要设备的电力供应。

1.2 系统配置和法规适应性分析

国家核安全局发布的HAD 102/13—2021《核动力厂应急动力系统》对应急电源系统明确提出以下要求：在厂外电和主发电机发生故障且未能恢复时，安全级电力系统需自动启动备用电源，并按既定顺序加载各类安全负荷；机组在正常运行或停堆工况下，允许通过手动操作将备用电源切换至试验、维护和维修状态。上述规定构成了核电厂应急电源系统设计与运行的基本准则。

法国核岛设备设计和建造规则协会制定的RCC-E—2005《压水堆核电厂核岛电气设备设计和建造规则》对机组辅助设备的供电电源配置提出了明确要求，其包含主外部电源、辅助外部电源、内部应急电源（通常指EDG）以及内部后备应急电源（可为全厂断电SBO电源或其他形式的厂内备用电源）四部分。

针对电源配置要求，总体上HAD 102/13—2021和RCC-E—2005的要求是一致的，华龙一号应急电源系统的设计充分满足了标准中的各项要求。首先，在安全功能方面，EDG的设置确保了在失去厂外电力和主发电机的情况下，仍能为核电厂的安全相关设备提供可靠的电力支持，保障核反应堆的安全停堆和余热排出等功能的实现；其次，在安全分级上，EDG按照安全级进行划分，其设计、制造、安装和鉴定均需满足核安全法规中针对抗振、环境耐久性和质量保证的严格要求；再次，在自动响应和负载序列方面，EDG能够在优先电源和主发电机失效或断路器断开时自动启动和接入，并按照预设顺序加载；最后，在正常运行或停堆模式下，EDG可手动切换

至试验、维护和维修状态，方便对设备进行定期检查和维护，确保其随时处于良好的备用状态。

针对EDG的启动时间，原则上机组启动并达到额定电压和频率的速度越快，越有利于快速承担安全负荷，保障系统的连续运行。然而，启动时间受限于设备自身设计、制造工艺和实际运行条件。启动时间要求越短，对柴油发电机的性能要求也越严苛，并且增加了其故障风险。不同法规标准对EDG启动时间要求对比见表1。

表1 启动时间要求
Tab. 1 Start time requirement

法规标准	名称	启动性能要求
HAF 102—2016	《核动力厂设计安全规定》	具备在所有规定工况下和在所要求的时间成功启动和运行的能力
HAD 102/13—2021	《核动力厂电力系统设计》	实际启动时间和接入时间应与安全分析中明确的启动时间相匹配
DL/T 5153—2014	《火力发电厂厂用电设计技术规程》	失电后第一次自启动恢复供电的时间可取 15~20 s
NB/T 20485—2018	《核电厂应急柴油发电机组设计和试验要求》	应能在技术规格书要求的时间内启动并加速到额定值

对比上述规范中对EDG启动时间的要求，仅DL/T 5153—2014《火力发电厂厂用电设计技术规程》中有详细的启动时间要求，其余规范均为原则性的要求。EDG从LOOP事故至开始加载负荷的启动时序见表2。

表2 EDG 启动时序
Tab. 2 Start sequence of EDG

(单位: s)			
序号	处理过程	本步骤占用时间	总时间
1	安全应急电源母线失电压	0	0
2	母线失电压持续 5 s	5	5
3	控制系统处理并发出 EDG 启动指令	0.2	5.2
4	EDG 启动, 到电压 / 频率达标	x	$5.2+x$
5	安全应急母线断开正常电源进线, 切换为 EDG 进线	1.54	$6.74+x$

根据事故工况下安全分析要求，低压安注泵需要在安注信号后32.5 s内达到满流量，低压安注泵启动时间为5 s左右，考虑低压安注泵不卸载，在0 s加载的情况下，EDG的启动时间 $x \leq 20.76$ s。

据国外经验反馈，法国核电厂柴油机早期经常出现拉缸问题，后经论证，将规范中要求的启动时间从10 s延长到15 s，拉缸问题得到明显改善。此外，由于华龙一号EDG容量增大，转动惯量也较大，启动时间要求越短，选型难度也越大。综上，EDG按15 s内启动并达到额定电压和频率，既满足了标准规范中对启动时间的要求，也能与事故工况下安全分析要求启动时间匹配，同时不至于因影响柴油发电机的可靠性而增加制造难度，在实际运行中更具可操作性。

2 设备主参数及燃油存储要求

2.1 设备主参数要求分析

华龙一号EDG额定电压为10 kV，发电机持续额定功率不小于8 000 kW，确保在事故情况下，EDG能够顺利启动核电厂内对应序列的全部负荷，包括各种安全相关的泵、风机、控制设备等，并且在启动后能够保持稳定的电力输出，满足核电厂在事故期间的电力需求，保障核电厂的安全运行。EDG燃料储备容量可以满足额定功率连续运行至少190 h，其中主储油罐容量应至少满足额定功率连续运行至少7天。

2.2 设备主参数与法规适应性分析

RCC-E—2005规定厂内存储的燃料必须保证柴油发电机在满负荷情况下能运行至少3天。HAD 102/13—2021规定备用电源应具备足够的容量和能力，以启动对应序列的全部负荷并保持连续供电；厂内燃油应足够支持备用电源运行至厂外电源恢复。GB/T 12788—2021《核电厂安全级电力系统准则》进一步细化了对备用电源运行时间的要求，明确现场储存的能源（燃料）应能在事故后使备用电源在下列较长的时间内运行：① 7天；② 在极限设计基准事

件后，从远离核电厂的地方补充能源所需要的时间。

EDG是保障核安全的最后一道防线，对其可靠性和持续运行能力提出了近乎苛刻的要求。主储油罐容量满足连续运行至少7天，遵循标准中的最高要求，确保在厂外电源恢复之前，应急电源系统能够为核电厂提供持续稳定的电力，避免因电力供应中断而导致的安全风险。同时，要求柴油发电机以额定功率连续运行至少190 h，考虑柴油发电机在进行22 h负荷能力试验之后，立即由试验工况转入应急工况，且带负荷连续运行7天的极端工况。

根据HAF 102—2016《核动力厂设计安全规定》要求，核动力厂应设有应急动力源，以在任何预计运行事件或设计基准事故下一旦丧失场外电源可提供必要的动力供应。因此，EDG需要考虑能够在LOOP叠加设计基准事故时为缓解事故所需设备提供动力电源，同时需要考虑事故长期阶段发生火灾时的消防负荷，并考虑不同气候条件时机组负荷的变化情况。在确定EDG选型容量时，对于南方厂址，一般考虑长期失去厂外电源+内部火灾+夏季工况、长期失去厂外电源+小LOCA（丧失冷却剂事故）+内部火灾+夏季工况、长期失去厂外电源+大LOCA+内部火灾+夏季工况等，针对不同工况梳理详细负荷清单，并计算出最大需求容量，参考了RCC-E—2005的要求，留有10%的容量裕度。

3 性能要求

3.1 主要性能指标

EDG在加载期间频率不应下降到额定值的95%以下，电压不应下降到额定值的80%以下。在发生超速故障时，其转速不应超过额定转速的115%。这一限制能够有效防止因超速运行而导致的设备损坏或安全事故发生。此外，设备应具备承受一定时间的短路故障能力，以及一定次数的非同期并网能力。这些功能使得EDG在面对复杂的电网故障和并网操作时，能够保持较高的运

行稳定性和适应性，从而更好地满足应急供电的需求。

3.2 主要性能指标与法规适应性分析

EDG的性能等级是衡量其整体性能和质量的重要指标。根据相关标准，其性能等级要求不低于GB/T 2820.5—2009《往复式内燃机驱动的交流发电机组 第5部分：发电机组》中规定的G2级，同时考虑核电运行特性差异，EDG设备性能要求见表3。

表 3 EDG 设备性能要求
Tab. 3 Performance requirements for EDG set equipment

参数	运行要求	考核执行原则
频率降	≤ 5%	GB/T2820.5—2009 中 G2 级
稳态频率带	≤ 1.5%	GB/T2820.5—2009 中 G2 级
瞬态频率偏差 —100% 突减功率	甩掉 110% 负荷，甩负荷试验引起柴油机转速的增加不超过其额定转速与超速保护限定值之差的 75% 和额定转速 15% 之中的较小值	NB/T 20485—2018RK
瞬态频率偏差 (突加功率)/ 频率恢复时间	频率不应下降到额定值的 95% 以下 电压不应下降到额定值的 80% 以下 频率恢复到其额定值的 98% 以及电压恢复到其额定值的 90% 的时间应小于这一程序步骤开始和下一程序步骤开始之间的时间间隔的 60%	RCC-E—2005
相对的频率容差带	2%	GB/T2820.5—2009 中 G2 级
稳态电压偏差	≤ ±2.5%	GB/T2820.5—2009 中 G2 级
相对的电压整定范围	≤ ±10%	GB/T 755—2019
瞬态电压偏差 —100% 突减功率	甩掉 110% 负荷，不会超速或过电压而引起停机或部件故障	NB/T 20485—2018RK

在运行参数方面，GB/T 755—2019《旋转电机定额和性能》和DL/T 5153—2014对电压和频率的波动范围提出了要求。发电机设计保证其可以在额定电压±8%的电压范围和47.5~51.5 Hz的频率范围内运行，这与法规要求一致。在加载与带载要求方面，RCC-E—2005和DL/T 5153—

2014规定了频率和电压的下降限值。在保护功能方面，NB/T 20485—2018要求在柴油机超速和或发电机差动过电流时，机组应自动停机，并在事故工况期间闭锁其他保护特性。实际做法中，EDG在应急供电运行时，仅投入少量应急保护动作于跳闸停机，其他非应急保护仅发出报警，这与法规要求一致，确保了在事故工况下机组的安全运行。

在并网能力方面，RCC-E—2005要求柴油发电机组在其寿命期内至少能承受两次反相并网，而GB/T 7064—2017《隐极同步发电机技术要求》则规定了并网时电压、频率和相位差的限制条件。华龙一号EDG具备一定次数的非同期并网能力，符合法规要求，确保了机组在并网过程中的安全性和稳定性。

4 结束语

本文从标准溯源的角度出发，对核电厂应急电源系统的功能要求及相关标准进行了系统整理，并以华龙一号应急电源系统为案例进行了详细分析。华龙一号的应急电源系统严格遵循核安全法规及标准设计，其EDG能够在15 s内启动并达到额定电压和频率，确保在失去厂外电源和主发电机功率时快速为重要设备提供可靠电力。在设备主参数方面，华龙一号EDG的额定电压为10 kV，持续额定功率不小于8 000 kW，燃料储备可满足至少190 h的连续运行，符合GB/T 12788—2021标准要求。性能要求在GB/T 2820.5—2009规定的G2级基础上，基于核电厂相关规范和负荷特性进行了优化。分析结果表明，华龙一号应急电源系统的配置选型、运行性能及安全合规方面均符合相关标准要求，可有效保障核电厂的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定: HAF 102—2016[S].
- [2] 国家核安全局. 核动力厂电力系统设计: HAD 102/13—2021[S].
- [3] 国家标准化管理委员会. 核电厂安全级电力系统准则: GB/T 12788—2021[S].
- [4] 国家标准化管理委员会. 往复式内燃机驱动的交流发电机组 第5部分: 发电机组: GB/T 2820.5—2009[S].
- [5] 国家能源局. 核电厂应急柴油发电机组设计和试验要求: NB/T 20485—2018[S].
- [6] 国家能源局. 火力发电厂厂用电设计技术规程: DL/T 5153—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [7] 国家标准化管理委员会. 旋转电机定额和性能: GB/T 755—2019[S].
- [8] 国家标准化管理委员会. 隐极同步发电机技术要求: GB/T 7064—2017[S].
- [9] 李剑波, 周舟. 核电厂应急柴油发电机组定期试验启动方式的探讨[J]. 核科学与工程, 2017, 37(4): 638-643.
- [10] 王晋. 超级电容作为核电厂应急柴油发电机组启动期间后备电源的可行性研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1): 175-179.

作者简介

廖文兴(1992—)，男，工程师，研究方向为核电厂应急及备用电源系统、配电设计与应用。

(收稿日期: 2025-05-10)