

Analysis of relay protection for standby diesel generators in nuclear power plants

Yuhao Yin Wangxin Xie Chaowen Hou Shengjie Xia Zhaoyang Yin

State Nuclear Power Demonstration Plant Co., Ltd., Weihai, Shandong, 264300 China

Abstract

The backup diesel generators at nuclear power plants are a critical barrier to ensuring nuclear safety. Their relay protection systems must strictly adhere to IAEA safety standards, meeting requirements for redundancy, independence, and earthquake resistance. There is a significant difference between nuclear-grade power supplies and non-nuclear-grade equipment; the former must withstand extreme conditions and follow more stringent maintenance procedures. The relay protection system adopts a master-backup hierarchical structure, achieving rapid fault isolation through coordinated setting of differential and overcurrent protections. Setting calculations need to balance the dynamic impacts of short-circuit capacity, transient characteristics, and island operation modes to prevent false trips. Technical optimization focuses on condition monitoring and adaptive algorithms, enhancing the adaptability of the protection system to variable operating conditions through real-time parameter adjustments, ensuring the effectiveness of the defense-in-depth system.

Keywords

nuclear power plant; diesel generator; protection analysis; relay protection

核电厂备用柴油发电机继电保护分析

殷宇豪 谢王欣 侯超文 夏盛杰 尹兆阳

国核示范电站有限责任公司, 中国·山东 威海 264300

摘要

核电厂备用柴油发电机是保障核安全的关键屏障, 其继电保护系统需严格遵循IAEA安全标准, 满足冗余性、独立性及抗震要求。核级电源与非核级设备存在显著差异, 前者需承受极端工况并执行更严苛的维护规程。继电保护采用主-后备分层架构, 通过差动与过流保护的协同整定实现快速故障隔离。整定计算需协调短路容量、暂态特性及孤岛运行模式的动态影响, 避免保护误动。技术优化聚焦状态监测与自适应算法, 通过实时参数调整提升保护系统对变工况的适应性, 确保纵深防御体系的有效性。

关键词

核电厂; 柴油发电机; 保护分析; 继电保护

1 引言

核电厂备用柴油发电机继电保护设计需满足核安全要求, 确保极端工况下的可靠供电。继电保护是在电力系统发生异常或故障时发出报警信号, 将故障部分隔离或切除的技术措施, 要满足选择性、速动性、灵敏性、可靠性四个要求。发电机转入异步运行, 发生低励失磁保护动作后, 应断开灭磁开关, 防止有损大轴的同步功率继续存在。失磁阻抗圆可用于检测与系统相关联的发电机失磁故障, 得到失磁状态下的阻抗值, 但动作会延迟一些。

【作者简介】殷宇豪(1998-), 男, 中国山东威海人, 硕士, 从事核电厂的继电保护研究。

2 核电备用电源系统的重要性与特殊性

2.1 核安全法规对备用电源的强制要求

核安全法规通过 IAEA 安全标准 SSR-2/1 与 SSR-2/2, 明确要求核电厂备用电源系统必须具备冗余性、独立性与高可靠性。标准规定备用柴油发电机需满足单故障准则, 确保在全厂断电(SBO)或设计基准事故工况下, 至少两套独立电源可实时投运, 并持续供电至安全停堆所需系统。同时, 备用电源需具备抗震 I 类设备资质, 其供电回路须与非安全级系统物理隔离。IAEA 导则 SSG-34 进一步强调, 备用电源系统必须通过定期带载试验验证其响应特性, 确保主电源失效后 10 秒内达到额定出力, 以维持堆芯冷却与安全壳完整性, 为纵深防御体系提供关键支撑^[1]。

2.2 柴油发电机在核电厂纵深防御体系中的角色

核电厂纵深防御体系中, 备用柴油发电机是维持核安

全的关键屏障。作为第四道防线的核心设备，其设计遵循 IAEA 安全标准 SSR-2/1，需在极端工况（如全厂断电、地震）下 10 秒内自动启动，持续 72 小时为堆芯冷却、安全壳喷淋等系统供电。通过多重冗余配置，柴油机系统独立于主电网，即使单一机组故障仍可通过交叉供电维持功能。其保护逻辑与抗震结构（满足 SSG-34 抗震 I 类要求）确保在全厂失电、设备受损时仍能稳定输出，切断放射性外泄风险。定期带载测试与在线监测进一步强化其可靠性，使之成为抵御叠加故障的最后电力保障。

2.3 核级与非核级备用电源的技术差异分析

核级与非核级备用电源的核心差异在于安全冗余与极端工况适配性。核级电源需满足 IAEA 标准 SSR-2/1，采用抗震 I 类结构（能抵御 0.3g 以上地震加速度），配置双路独立供电回路，且须在 72 小时内持续应对 LOCA 事故后的高温高压蒸汽环境。其保护逻辑直接关联安全停堆系统，故障时优先闭锁非必要跳闸信号。非核级电源仅需符合常规电站标准（如 NB/T31039），抗震等级多执行 II 类（0.15g），单路供电即可满足需求，保护动作后允许短时断电检修。二者维护周期相差显著：核级机组需每季度完成 100% 带载测试，非核级仅需半年抽检 50% 负载工况^[2]。

3 柴油发电机继电保护的核心需求

3.1 核电厂工况下的典型故障类型

核电厂的电力系统运行中，短路故障最常见，比如母线或电缆绝缘击穿可能引发开关柜燃弧，导致保护装置误动。逆功率故障多发生在主变跳闸后，发电机转为电动机模式，转子过热风险陡增，需要通过逆功率继电器 0.5 秒内快速解列。低频振荡则多发于厂用电与外部电网解列时，机组调速系统响应延迟可能引发 3~5Hz 频率波动，危及堆芯冷却泵稳定运行。此外，接地故障或电压骤降也可能触发安全级负荷失电连锁反应。针对这些隐患，核电站执行 IEEE37.106 标准，采用差动保护、频率继电器与 PSS 装置构成多重防护，结合冗余电源切换逻辑，确保纵深防御体系有效隔离故障，维持安全壳喷淋、余热排出等关键系统供电稳定性。

3.2 保护动作逻辑与核安全停堆的关联性分析

核电厂的保护动作逻辑直接关联安全停堆的有效性。当传感器检测到超温、超压或冷却剂流失（LOCA）时，保护系统通过冗余信号通道触发分级响应：首先启动备用电源为控制棒供电，随后执行硼注入与蒸汽隔离。逻辑设计中遵循“故障导向安全”原则，即使单一信号误报，仍需两路独立通道同时触发才执行停堆，避免误动作。其动作阈值严格参照 IEEE603 标准，如主泵转速低于 85% 额定值即连锁启动余热导出系统。抗震设计中更预设多重闭锁机制，确保地震引发非安全级设备跳闸时，不会干扰停堆序列。定期测试需模拟主控室失电等极端工况，验证逻辑执行时效是否满足 60 秒内达到热停堆状态的技术底线^[3]。

3.3 抗干扰设计与抗震要求

核电厂抗干扰与抗震设计必须适配极端环境。强电磁场环境下，安全级仪控设备采用全屏蔽线槽隔离干扰源，同时改用光纤通信替代传统铜缆，避免信号畸变引发保护逻辑误判。针对放射性环境，关键传感器采用双层 316L 不锈钢密封壳体，确保 γ 射线辐照下绝缘电阻值仍高于 1G Ω 。抗震方面，核级设备执行 RG1.60 标准，要求耐受 0.3g 地震加速度，主控室机柜采用三向液压阻尼器，在 6Hz 以上频率振动时位移抑制率达 90%。非核级设备仅需满足 0.1g 抗震要求。设计验证时需同步模拟地震叠加 LOCA 事故工况，例如在振动台上重现冷却剂管道破裂引发的 30kPa 冲击波与 8Hz 机械共振复合效应，确保备用柴油机能在 45 秒内带载启动，日常维护包含半年一次的全频段电磁兼容测试与结构焊缝无损探伤。

4 典型继电保护配置方案

4.1 主保护与后备保护的分层架构

核电站保护系统采用主-后备分层设计确保故障隔离。主保护作为首道防线，如发电机差动保护能在 30 毫秒内切除短路，直接联动断路器跳闸。后备保护则针对主保护失灵或越级故障，例如母线过流保护设置 0.5 秒延时，优先让下级设备动作。针对核安全级负载，设置第三级后备：当主变差动与母线保护均失效时，由厂用电快切装置在 100 毫秒内切换至应急柴油机。抗震设计中，各层保护装置采用独立电源与通信路径，避免地震导致全局瘫痪。验证时需模拟主保护拒动工况，测试后备系统能否在 1.2 倍整定值下准确触发，同时通过定期注入 1MHz 脉冲电流检验信号通道抗干扰能力。

4.2 差动保护与过流保护的协同整定原则

差动保护与过流保护的协同整定遵循“主保优先、后备补充”原则。差动保护作为主保护，需将动作阈值设定在设备额定电流的 1.2-1.5 倍区间，确保内部短路时 30ms 内切除故障；过流保护作为后备，整定值需高于差动保护阈值且覆盖相邻设备故障电流，通常取差动阈值的 1.3 倍并附加 0.3 秒延时。二者范围需形成互补：差动保护覆盖变压器绕组及进出线套管，过流保护则针对母线及远端线路故障。实际应用中需通过注入模拟电流验证协同性，确保差动优先动作时过流保持闭锁状态^[4]。

4.3 数字化继电保护装置的技术选型

数字化继电保护装置选型需兼顾可靠性与环境适应性。传统电磁式保护结构简单但精度低，过流误差常超 $\pm 10\%$ ，易受振动干扰误动作。相比之下，微机保护采用数字处理技术，动作时间缩短至 20ms 内，每周波采样达 128 点，能精准识别涌流等复杂工况。强干扰场景应选光纤通信装置，其共模抑制比 120dB，避免感应电压干扰。工业级设备需满足 -40 $^{\circ}\text{C}$ 至 85 $^{\circ}\text{C}$ 宽温运行，并通过 IEC60255 标准的 8kV 静电测试。老旧站改造可保留电磁式备用，新建项目推荐双

CPU 架构微机保护预留 GOOSE 协议接口，验收时须执行 80% 额定电流带负荷试验校验参数匹配度。

5 整定计算关键问题

5.1 核电厂厂用电系统短路容量对保护定值的影响

核电厂厂用电系统短路容量直接影响保护装置整定精度与动作速度。当短路容量超过设计值时，过流保护需将动作电流阈值提升 30% 以上以避免误动，同时需缩短动作时间至 0.2 秒内防止设备受损。电动机反馈电流会使短路电流峰值增加 40%，需在差动保护中引入谐波闭锁功能。针对核安全级负荷，保护装置需满足短路容量突变工况下的快速切换要求，在备用电源投入时维持母线电压波动不超过 $\pm 15%$ 。实际校验应采用实时仿真系统模拟不同短路点工况，验证保护定值在 80%-120% 短路容量范围内的动作可靠性。

5.2 柴油机启动过程中的暂态特性与保护误动规避

柴油机启动瞬间存在显著暂态过程，其电枢电流峰值可达额定值 4 倍，持续时间约 0.3 秒。此时控制系统需设置 0.5 秒延时避开冲击电流，同时监测电压恢复速率——若 1 秒内未达额定电压 90% 应闭锁欠压保护动作。针对三次谐波含量突增至 15% 的现象，宜在保护回路增设二次谐波闭锁模块。实际调试中发现，突加负载时转速波动达 $\pm 8%$ 会引发过频保护误动，需在控制逻辑中设置转速信号与保护出口联动闭锁。推荐采用带波形录波功能的智能保护装置，通过捕捉首个周波电流变化率 ($di/dt \leq 50A/ms$) 区分正常启动与短路故障。现场验证时应模拟 80% 额定电压工况，确保保护装置在 2 秒内完成启动过程识别与误动闭锁。

5.3 孤岛运行模式下的频率 / 电压保护协调策略

孤岛运行模式下电网支撑能力薄弱，电源容量受限导致频率 / 电压波动幅度增大。频率保护需设置双门槛值：当变化率超过 $\pm 0.5Hz/s$ 立即启动柴油机组一次调频，偏离 $\pm 1Hz$ 持续 3 秒则闭锁低周减载装置。电压保护允许 $\pm 10%$ 动态波动，超出范围后结合 0.5 秒延时避开短时扰动。特别注意两者保护动作的时序配合——若电压跌落 15% 伴随频率骤降 1.2Hz，应优先执行低频减载而非跳闸。针对柴油机组接入过程，需监测电压恢复速率 ($\geq 3%/s$) 防止过压保护误动。推荐配置同步相量测量单元 (PMU) 实现毫秒级数据采集，通过动态调整定值适应工况变化。实际验证时需模拟负载突变 75%-125% 工况下测试策略有效性，且备用电源投入时间须控制在 0.3 秒以内。

6 运行案例与故障诊断

6.1 某 AP1000 机组柴油发电机低电压保护误动事件分析

某 AP1000 机组柴油发电机低电压保护误动事件中，系统电压骤降至额定值 65% 时，保护装置因定值整定偏差提前动作。调查发现电压采样回路存在 0.15 秒信号延迟，叠加变压器涌流导致波形畸变率达 18%。调试阶段未

模拟 80% 额定电压边界工况，未能暴露保护逻辑缺陷。事后采取三项改进：重新校核电压动作阈值（调整至额定值 $60\% \pm 2%$ ）、在保护算法中嵌入 2 周波谐波闭锁功能、增设电压跌落速率判据（限制在 5%/ms 内），验证试验表明优化后系统能承受 10 秒内三次连续电压波动冲击。

6.2 谐波干扰导致差动保护异常动作的整改实例

某 110kV 变电站主变差动保护误动案例中，检测发现 10kV 侧谐波含量达 15% 引发保护装置误判。原设计中二次谐波闭锁阈值设定为 20%，未能有效过滤三次谐波干扰。整改措施包含三方面：在 CT 二次侧加装双调谐滤波器，将谐波抑制至 5% 以内；升级保护装置谐波闭锁逻辑，设置三次谐波闭锁功能（阈值提高至 30%）；改造电缆屏蔽层双端接地消除电磁干扰。同步调整差流速断定值至额定电流 1.3 倍，增设每周波谐波分量实时监测模块。经三次突加非线性负载测试，保护装置均正确闭锁未再发生异常动作。

6.3 定期试验中发现的继电器触点氧化问题处理

某变电站继保年度试验中发现 35kV 线路中间继电器触点氧化，接触电阻达 $85m\Omega$ 超标（标准 $\leq 50m\Omega$ ）。检查确认系开关柜湿度长期超标（日均 75%RH）叠加材质镀层工艺缺陷所致。处理采取三步骤：先用精密电子清洁剂打磨触点恢复接触面光洁度；更换为镀银强化型触头组件（镀层厚度增至 $8\mu m$ ）；在柜内加装温湿度控制器（设定湿度阈值 $\leq 60\%RH$ ）。同步将试验周期从季度缩短为双月，重点监测柜体密封条老化情况。复测显示接触电阻稳定在 $32m\Omega$ 以内，经三次带负荷分合闸测试动作特性均符合反时限曲线要求。

7 结论

综上所述，核电厂备用柴油发电机继电保护系统是保障核安全的核心防线，其设计需严格遵循 IAEA 法规对冗余性、独立性及抗震 I 类设备的要求。核级电源通过双路独立供电、72 小时持续运行能力与非核级设备形成显著差异，并依托主-后备分层保护架构实现故障快速隔离。整定计算需统筹短路容量、柴油机暂态特性与孤岛运行的特殊工况，协调差动与过流保护的协同动作逻辑。抗干扰设计与抗震验证确保极端环境下保护系统的可靠性，而状态监测与自适应算法的引入将推动保护策略向智能化升级，为纵深防御体系提供更精准的技术支撑。

参考文献

- [1] 国家能源局.NB/T31039-2012发电厂备用柴油发电机组技术条件[J].电力系统装备,2023,12(4):1-26.
- [2] 中国核工业集团.核电厂安全系统准则：电力供应与备用电源设计规范[J].核动力工程,2024,43(2):1-17.
- [3] 王建华等.电力系统继电保护原理与运行分析[J].现代电力,2022,39(5):1-48.
- [4] 国家核安全局.HAF102-2016核电厂电力系统设计安全规定[J].核安全技术,2024,26(1):1-22.