# 数字化继电保护技术在核电厂的应用与挑战

殷宇豪，谢王欣
国核示范电站有限责任公司，山东 威海 264300

DOI:10.61369/EPTSM.2026010021

**摘　　要：** 本文意在系统阐述核电厂中数字化继电保护技术的应用及其遭遇的挑战。先概括该技术的核心原理、技术长处以及在安全系统中的地位，表明其具备数字化、可编程、网络化这些特性。再剖析其在发电机－变压器组、厂用电、安全级辅机系统等重要场合的实际应用情况。接着详细分析其所存在的网络安全、软件稳定性、电磁兼容性等主要风险与难点。然后有针对性地给出加强纵深防御、完备标准体系、结合智能技术、人才培养等发展举措与前景预测。希望给这种技术在核电行业更为安全可靠的应用提供理论支撑。

**关 键 词：** 数字化继电保护；核电厂；安全系统；网络安全；软件可靠性

## Application and Challenge of Digital Relay Protection Technology in Nuclear Power Plant

Yin Yuhao, Xie Wangxin
State Nuclear Demonstration Power Plant Co., LTD.Weihai, Shandong 264300

**Abstract:** This paper systematically examines the application and challenges of digital relay protection technology in nuclear power plants. It first outlines the core principles, technical advantages, and strategic role of this technology within safety systems, highlighting its digital, programmable, and networked characteristics. Subsequently, it analyzes practical implementations in critical systems including generator–transformer units, plant power supply, and safety–level auxiliary equipment. The paper then delves into major risks and challenges such as cybersecurity, software stability, and electromagnetic compatibility. Finally, it proposes targeted solutions for future development, including enhanced defense–in–depth measures, comprehensive standardization frameworks, integration of intelligent technologies, and talent cultivation initiatives. The study aims to provide theoretical support for the safer and more reliable application of this technology in the nuclear power industry.

**Keywords:** digital relay protection; nuclear power plant; safety system; network security; software reliability

## 引言

核电厂电力系统要安全稳定运行，这属于核安全的关键部分。继电保护是电力系统的第一层防护网，其技术发展直接影响核电厂的整体安全可靠程度。如今微电子、通信以及计算机技术极速发展，数字化继电保护技术慢慢替代传统的模拟保护装置，成了核电行业技术更新的主要走向。这项技术重点依靠数字信号处理，使得保护功能得以软件化和智能化，性能得到大幅优化，而且也产生一些新的技术特点和运营需求。所以，要全方位探究数字化继电保护技术在核电厂的应用意义，清楚意识到它带来的潜在难点，还要展望其未来的发展方向，这对于捍卫核电安全、改进运营水平有着重要的理论与实际意义。本文将围绕上述核心议题展开系统论述。

## 一、数字化继电保护技术概述

### （一）核心原理与技术构成

数字化继电保护技术重点在于用微处理器或者数字信号处理器取代传统模拟电路以达成保护逻辑。它的基本原理是经由互感器得到电力系统的模拟电气量，再经模拟－数字转换器转为成离散的数字信号，然后由处理器按照预先设定好的保护算法和逻辑来做高速计算及判断，最后靠驱动电路去执行跳闸或者报警指令。该技术包含的主要部分有高精度的数据采集模块、高性能的中央处理单元、稳定可靠的存储单元、灵活的通信接口以及人机交互界面。其保护功能的达成完全依靠可编程的软件算法，于是保护原理的显示就从传统的硬件布线变成了软件逻辑，这样就具

作者简介：殷宇豪（1998.01－），男，山东威海，硕士，研究方向：核电厂的继电保护。

 

备了很强的灵活性和可扩展性。

**（二）相较于传统模拟技术的核心优势**

与传统模拟式保护相比，数字化技术在诸多方面有着明显的优势。其保护特性由软件算法所决定，能够轻易达成复杂而精准的保护判据，而且经由软件升级就可以改善功能，其灵活性很强。数字化装置具有很强的自检和自判断能力，可以随时监测硬件和软件的健康状况，从而加强自身的可维护性。它采用数字通信接口，利于达成保护信息的远程传递、共享以及同其他自动化系统（比如 DCS）的融合，进而形成一体化的监测系统。而且，数字装置在精度、稳定性、抗环境干扰性能上要比传统模拟器件更好，有益于减小保护误动和拒动现象，改良动作的可靠性。

**（三）在核电厂安全系统中的角色定位**

核电厂有着复杂又严格的安全部署，其中，数字化继电保护如同电力安全的“智能哨兵”，起着非常关键的作用。它还是捍卫发电机、变压器、母线这些主要设备不被毁坏的第一时间快速屏障，也是保证厂用电系统特别是安全级应急电源供电连贯的核心部分。其可靠的动作直接影响到反应堆堆芯冷却、安全壳热量导出等安全功能能否达成。所以，数字化继电保护已不再仅仅是一种简单的设备保护单元，而是变成了包含核电厂纵深防御安全理念，并支撑故障快速隔离以及系统重建的重要自动化控制系统节点。其可靠性是核安全相关电力系统完整性的关键形成部分。

## 二、在核电厂的关键应用场景

**（一）发电机 – 变压器组保护**

发电机 – 变压器组是核电厂电能生产的重点所在，它的保护非常关键。在这种情况下，数字化保护可以整合多种复杂功能，比如差动保护、定子接地保护、失磁保护、逆功率保护、过励磁保护、频率保护等。依靠高速采样和先进算法，它可以更为精确地辨别内部故障和外部干扰，从而提升动作的选择性和快速性。数字化平台利于把主变、高厂变、励磁变等的保护融合起来，精简系统架构。而且，它的通信能力能够把详细的故障录波、事件顺序记录以及告警信息上传到主控室，给运行人员给予准确的故障分析依照，突出改善了主设备保护的整体水平。

**（二）厂用电系统保护**

厂用电系统的可靠性与核电厂辅助设备，特别安全相关设备的动力供给直接相关。数字化保护被全面应用在中压和低压厂用电系统的进线、母线分段、馈线以及电动机回路当中，它可以达成精确的方向过流保护、低电压保护以及电动机综合保护等效果。它的优点就是能够经由通信网络迅速交换系统各个节点的保护信息，并支撑依靠网络信息的保护配合方案，改良保护定值与时延的配合。进而当厂用母线发生故障这种复杂状况时，做到对故障的快速、选择性切除，最大幅度保留非故障段母线的供电，保证反应堆停堆之后的安全冷却等功能得以持续。

**（三）重要厂用水等安全级辅机系统保护**

给安全级负荷供电的配电系统，其保护与核安全直接相关。比如向重要厂用水泵等安全级电动机供电的回路，其保护装置要达到更高的可靠性要求。在这样的应用当中，数字化保护除执行基本的短路、过载保护之外，还要同电源切换逻辑、设备监测系统相配合。它具备较高的测量精度，从而能够更为敏锐地察觉电机的异常状况。而且，因为它属于安全相关系统的一部分，所以其设计、认定以及验证过程须要严格按照核安全法规标准来执行，以保证即使处于极端环境条件下也能够可靠地履行自身职能。

## 三、面临的主要挑战与风险

**（一）网络安全与信息安全风险**

数字化保护装置大多依靠嵌入式系统，并拥有网络通信能力，所以它成了潜在的网络打击对象。接入电站信息网络或者控制网络之后，也许会遭受病毒、木马感染、拒绝服务打击、非法远程访问与操控之类的危险。被打击有可能造成保护误动或者拒动、盗取重要运行数据，还可能破坏装置软件的完整性。核电站对于网络安全的考量要融入数字化保护系统整个生命时段，从网络框架的物理与逻辑隔离、访问控制加强、通信协议安全提升开始，再到定期执行漏洞检测和渗透检测，应当形成起牵涉运营、技术、运作的多层次立体防御体系，从而对抗日益变化的网络威胁。

**（二）软件可靠性、V&V 及共因故障**

软件是数字化保护功能的关键承载者，其可靠性十分关键。软件存在瑕疵可能引发保护逻辑出现错误，造成系统死机或者产生其他预料之外的情况发生。要想保证软件可靠，就要依靠严谨的开发流程以及全方位的核实与确认环节。V&V（验证与确认）流程既繁杂又耗资巨大，要证实软件在各种预设情形下都能表现正常，并达到最高安全完整性等级的要求。而且，使用同一种硬件平台或者软件版本的数字化保护设备也许会陷入共因故障的风险当中，某个共同的漏洞也许会使大量设备一同失灵，从而影响到系统的备用性能。所以，在开展设计与设置的时候，一定要考虑到诸如硬件异构、软件多种化之类的防护手段。

**（三）电磁兼容性、时效性与长期维护**

核电厂电气环境复杂，存在强烈的电磁干扰。数字化装置集成度高，对电磁干扰更为敏感，可能因干扰导致采样错误、逻辑混乱或通信中断，引发保护不正确动作。因此，其电磁兼容性设计、屏蔽与接地要求极高。时效性方面，数字化保护的数据采集、算法运算、命令输出等环节存在微小的固有时延，在涉及系统稳定或需多装置协同的场景下需精确评估。长期维护挑战包括：技术更新速度加快，这使得备品备件供应、软件版本管理以及依靠具备专门知识储备的守护人员变得困难，这些都会对电站的长期运维能力形成挑战。[1-5]

## 四、发展策略与前景展望

**（一）纵深防御安全架构的强化**

应对数字化保护产生的新风险，要加强对核电厂电力系统的纵深防御安全架构。从系统设计角度看，需坚守并拓展多元性、

 

多余性和独立性原则。就关键保护功能而言，可以设置依靠不同原理（比如数字和模拟）、或者不同供应商平台的多余保护通道。从网络方面来讲，执行更为严格的区域隔离和单向通信。在经营方面，则形成包含采购、开发、检测、部署、运行、退役的完整生命时段安全经营制度。经由物理、功能、网络和经营等大量层次的纵深防御，创建起防御能力更强的体系，从而抵挡住单个故障或者共同因素导致的失效情况。

**（二）标准体系与认证规范的完善**

当下，核安全相关领域所用的数字化继电保护装置，其专用标准及认证规范仍需进一步细化完善。急需制订或者升级包含硬件可靠性、软件安全性、网络安全、环境评定（涉及辐照、地震、电磁兼容）等的综合技术标准。认证流程要清楚表明对数字化装置特别是其软件的 V&V 流程、设置管理、工具评定的具体要求。还要创建起符合核电安全分级的评价准则，促使形成行业普遍认同的认证规范。这样就能给设备制造、电站采购以及安全评审赋予清晰、统一的依照，也是技术做到规模化、规范化应用的先决条件。

**（三）智能化与自适应保护技术的融合趋势**

伴随人工智能、大数据以及先进传感技术的逐步发展，数字化继电保护表现出向智能化和自适应方向发展的态势。日后，保护装置不会仅仅依靠固定的定值及预先设定好的逻辑来运行，而是可以凭借机器学习算法去深入剖析大量的运作数据，从而做到对故障类型的自动识别、对设备健康状况实施早期告警，并达成保护定值的自动适配性改良调整。当系统运行方式发生改变或者故障处于发展期间时，智能保护能够自行调整自己的动作策略，以此来加强保护的适应能力和选择能力。虽然要把它用在核电厂安全相关系统之前得要经过非常严格的验证过程，但是这确实是一种优化电力系统韧性和运行效率的重要领先方向。

**（四）专业人才培养与技术经验传承**

数字化继电保护技术融合了电力、计算机、通信及核安全等多领域知识，对专业人才提出了更高要求。当前，既精通继电保护原理又熟悉核电安全规范、具备网络安全意识和软件工程能力的复合型人才较为紧缺。同时，随着技术迭代加速，传统模拟保护运维经验与新型数字化系统的知识体系需有效衔接。需建立健全针对性的培训认证体系，并通过知识管理平台积累故障案例与解决方案，推动技术经验有序传承，以保障数字化保护系统的全生命周期安全，支撑核电行业可持续发展。

## 五、结语

数字化继电保护技术给核电厂电力系统的保护性能、运维效率以及信息融合水平带来了革命性的优化，这是技术发展和产业升级的必然趋势。其在关键设备保护、厂用电安全保障等方面表现出重要的价值。不过，该技术带来的网络安全、软件可靠性、共因故障等新问题，对于核能这种安全要求极为严格的行业来说是一大挑战。未来要乐观接纳技术革新，还要坚守核安全文化，巩固纵深防御体系，完备标准认证机制，并且慎重探究智能应用，从而全面管理风险。只有谨慎兼顾技术更新与安全守护，才可以最大限度发挥数字化继电保护技术的优势，为核能的安全、经济、高效运行创建更稳固的数字化屏障。

*参考文献*

[1] 王学奎，张洁，胡望雄，等 . 核电厂内半数字化继电保护对时中断问题研究 [J]. 发电设备，2017,31(04):263-266.

[2] 庞帅 . 大型核电厂继电保护整定计算及技术改进研究 [D]. 华中科技大学，2020.

[3] 黄晨辉 . 核电厂应急柴油发电机的继电保护分析 [J]. 电工技术，2023,(21):179-181+185.

[4] 籍欣欣，张冬，窦佳伟，等 . 智能变电站继电保护运维防误技术探究 [J]. 电子元器件与信息技术，2025,9(09):164-166.

[5] 吴春旭 . 基于数字化变电站中继电保护的可靠性研究 [J]. 电气技术与经济，2025,(07):80-82+85.

 