

Research on Anti-Interference Design and Performance Verification of Electrical Secondary Relay Protection Devices

Fantao Wu

Yunfeng Power Plant, State Grid Lvyuan Hydropower Company, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

Electrical secondary relay protection devices serve as critical components for the safe operation of power systems, where their anti-interference performance directly impacts the accuracy of protection actions and system stability. With the increasing intelligence of power grids, challenges such as electromagnetic interference, power fluctuations, and communication noise have become more prominent. Based on analysis of interference sources and transmission mechanisms, this paper proposes a comprehensive protection system integrating hardware electromagnetic compatibility design, optimized signal isolation and filtering, and collaborative software fault tolerance with anti-interference algorithms. Simulation and field tests demonstrate that combining shielding and grounding optimization with digital filtering technology can significantly reduce interference amplitude and enhance system immunity. Adaptive algorithms and data redundancy mechanisms further improve device robustness. This research provides crucial technical support for improving the reliability of relay protection devices and ensuring the safe operation of smart grids.

Keywords

electrical secondary system; relay protection; anti-interference design

电气二次继电保护装置的抗干扰设计与性能验证研究

吴钊滔

国网绿源水力发电公司云峰发电厂, 中国·吉林 集安 134200

摘要

电气二次继电保护装置是电力系统安全运行的关键环节,其抗干扰性能直接关系到保护动作的准确性与系统稳定性。随着电网智能化程度提升,电磁干扰、电源波动及通信噪声等问题愈加突出。本文基于干扰源与传导机理分析,提出硬件电磁兼容设计、信号隔离与滤波优化、软件容错与抗干扰算法协同的综合防护体系。通过仿真与实测验证发现,屏蔽与接地优化结合数字滤波技术可显著降低干扰幅值,提高系统抗扰度;自适应算法与数据冗余机制进一步增强装置稳健性。研究为提升继电保护装置可靠性和智能电网运行安全提供了重要技术支持。

关键词

电气二次系统; 继电保护; 抗干扰设计

1 引言

电气二次系统是电力系统中承担信息采集、信号传输与控制执行的重要环节,其核心设备——继电保护装置在异常情况下承担切除故障、保障电网稳定的关键任务。近年来,随着电力系统的自动化与数字化程度不断提高,装置电子化、通信化特征更加显著,使其暴露在复杂的电磁环境之中^[1]。高频脉冲干扰、电磁辐射、地电位反击、浪涌冲击等因素,均可能导致保护误动、拒动或数据异常,从而引发系统连锁故障。抗干扰设计因此成为继电保护装置研发的重要方向。本文基于电磁兼容理论与系统工程方法,从硬件设计、软件算法及实验验证三方面入手,构建抗干扰技术体系,

【作者简介】吴钊滔(1989-),男,中国吉林集安,本科,中级,从事电气二次继电保护研究。

并通过性能测试验证其有效性,旨在为电气二次系统的可靠运行提供可行的设计与验证参考。

2 电气二次继电保护装置的干扰特征与影响机理

2.1 干扰源与干扰类型分析

电气二次系统处于强电磁耦合环境中,其干扰来源可分为系统内部与外部两大类。内部干扰主要源自电力设备运行过程中的高能开关操作、电弧放电、变压器励磁涌流及电力电子元件产生的高频谐波。这些干扰常沿电源线与控制回路传导,对敏感信号通道造成冲击。外部干扰则多由雷击、电磁辐射、地电位反击及通信线路感应耦合引起,其影响范围更广、能量更高。干扰信号的频谱特征从低频工频谐波到高频瞬态脉冲均有分布,呈现出突发性与随机性。传导途径包括电源线传导、信号线感应以及空间电磁辐射三种形式^[2]。

在复杂耦合条件下，干扰会导致采样偏移、逻辑误触发、通信丢包等问题，从而威胁继电保护装置的准确性与系统运行的连续性。

2.2 干扰对继电保护装置的影响机理

干扰信号通过电磁感应或导通路径侵入装置电路，产生寄生电压、电流并干扰信号处理过程。输入通道受到干扰时，易导致采样信号畸变，A/D转换精度下降，进而影响保护算法的判断结果。高频脉冲会在极短时间内改变电流、电压瞬态值，使系统误判故障类型或区段，造成误动或拒动。浪涌与静电放电可能损伤高阻输入模块及存储单元，诱发短暂失效或重启。通信干扰导致数据帧校验错误与丢失，破坏保护装置间的信息一致性，增加系统延时与误判风险。长期干扰还会引发元器件温漂、电磁老化及参数漂移，使保护特性偏离设计初值，降低装置可靠性与长期运行稳定性。

2.3 电磁兼容性设计的重要性

电磁兼容性(EMC)设计是提升继电保护装置抗干扰能力的核心途径，其目标是在复杂电磁环境中确保装置功能稳定，同时不对外界设备产生不良影响。通过抑制电磁发射与增强抗扰度两方面入手，EMC设计实现对干扰源、传导路径及敏感设备的综合控制。合理的屏蔽、滤波与接地措施可有效降低辐射耦合；信号隔离与电源净化技术则减少传导干扰^[3]。对于智能变电站与数字化配电系统而言，电磁兼容性不仅是硬件可靠性的关键评价指标，更是远程通信、自动化调度及信息安全运行的技术基础。高水平的EMC设计已成为电气二次系统从传统保护向智能化保护转型的重要保障。

3 抗干扰设计的硬件实现策略

3.1 电路结构优化与电磁屏蔽

在电气二次继电保护装置中，电路结构优化与电磁屏蔽是抗干扰设计的基础环节。多层印制电路板(PCB)的合理布局可有效减少信号耦合与寄生电感影响，通过信号层、地层与电源层的分层设计，使高频干扰通路得到约束。模拟与数字电路应在板上分区布置，以降低相互耦合效应。金属外壳屏蔽、电缆编织屏蔽和接插件屏蔽可阻断外部电磁辐射进入装置内部，其中屏蔽层的接地应采取单点连接，以避免形成地环路电流。对于低电平模拟信号，可采用差分输入与屏蔽放大电路，显著降低共模干扰影响；开关电源及逻辑控制模块应增加磁珠、共模电感和RC滤波网络，从而削弱高频尖峰脉冲。经过优化的电路结构不仅提升了抗干扰能力，还改善了电磁兼容性，为系统稳定运行提供硬件保障。

3.2 接地系统与信号隔离设计

科学的接地与隔离系统是防止干扰传导的关键。继电保护装置内通常设置保护地、信号地与电源地三类接地系统，采用单点汇流或多点等电位方式可有效控制地电位差。为防止地回路干扰，模拟部分宜采用“星形接地”方式集中

汇入总地端，而数字部分可根据干扰频率选用分段或屏蔽接地策略^[4]。信号隔离技术在不同功能模块间构建电气隔离屏障，常通过光电隔离器、磁耦合变压器或数字隔离芯片实现。隔离不仅防止高压干扰沿信号链传播，也能避免强弱电混合引发误触发。电源系统应配备LC滤波器、稳压模块与瞬态抑制电路，以保障供电纯净与稳定。在分布式保护系统中，采用屏蔽双绞线或光纤通信可从物理层面切断电磁干扰的传播路径，实现信号传输的安全与高保真。

3.3 浪涌与静电防护技术

在复杂电网环境中，雷击、电网切换及感性负载操作会产生高能浪涌，对继电保护装置的输入回路和电源模块造成冲击。浪涌防护设计应采用分级吸收策略：在一次入口处设置压敏电阻(MOV)以限制过压幅值，中间级使用瞬态抑制二极管(TVS)吸收剩余能量，末端辅以气体放电管或防雷模块泄放高电流脉冲，构成多层能量分散体系。针对静电放电(ESD)问题，可在面板、接插件及信号输入端添加导电涂层或防护环，使静电荷沿最短路径泄放至地。合理的接地屏蔽结构能进一步抑制放电反击效应。为验证防护效果，应依据IEC 61000-4-2和4-5标准进行测试，确保装置在±4kV接触放电及2kV浪涌条件下仍稳定工作。完善的浪涌与静电防护不仅延长装置寿命，还显著提升其在极端环境下的运行可靠性与抗扰能力。

4 软件抗干扰与容错机制设计

4.1 数据滤波与信号重构算法

软件抗干扰的核心在于信号质量优化与数据可靠性增强。电气二次系统的采样信号易受随机噪声、周期干扰及瞬态脉冲的影响，若不经处理，可能导致保护逻辑误判或采样漂移。卡尔曼滤波通过状态估计与协方差更新实现动态去噪，能有效消除随机扰动；均值滤波与加权移动平均法则在低频干扰环境中表现出较好的稳定性，适用于连续信号的平滑处理。对于电力系统常见的工频谐波干扰，陷波滤波器能精准消除特定频率成分，保证信号波形纯净。在采样异常或数据突变时，数据重构算法通过前后数据趋势建模与插值预测，实现连续信号的合理修复，避免因短时干扰触发保护误动作。通过自适应算法，系统可根据实时干扰强度自动调整滤波参数，实现动态响应优化，从而在复杂电磁环境下保持高精度与稳定性。

4.2 冗余逻辑与故障自诊断

冗余与自诊断是软件抗干扰的结构性保障。通过冗余判断机制与多通道采样设计，可在干扰状态下保持系统的容错能力与逻辑一致性。在关键保护单元中采用双通道独立采样系统，每个通道配备独立的A/D转换与数据比对逻辑，一旦某通道出现异常波动，由备用通道进行实时校核，避免错误动作。逻辑冗余不仅提升数据可信度，还增强了算法在极端环境下的决策稳定性。自诊断机制则通过周期性检测模

块温度、电源波动、信号偏差与通信状态，对系统健康度进行量化评估。当检测到异常参数时，程序可自动触发告警或重启模块，确保装置功能不受持续干扰影响。该机制赋予保护装置一定的“自愈能力”，在无人值守或远程监控环境中尤显重要，为电网自动化运维提供技术支撑。

4.3 通信与控制算法的防护机制

电气二次系统中的通信链路易受电磁耦合、数据丢包与延迟影响，需在软件层面建立完备的防护机制。通信防护采用CRC循环冗余校验、数据帧重发与时序比对策略，确保数据完整性与传输同步性。通过引入错误检测与自动纠错编码(ECC)技术，系统能在受干扰的信道中恢复原始信息。对控制逻辑而言，容错状态机可在信号异常时维持安全状态，而看门狗监控程序则防止CPU因强干扰陷入死锁，实现程序级恢复。数据缓存与时钟同步模块使系统具备抗延迟能力，在多节点通信中保持逻辑一致。软件防护策略与硬件滤波、隔离技术形成互补关系，显著提高装置在强电磁环境中的通信可靠性与控制稳定性，确保继电保护动作的及时性与准确性。

5 性能验证与实验分析

5.1 实验平台与测试方法

为了系统验证电气二次继电保护装置的抗干扰设计效果，构建了以DSP控制芯片为核心的实验验证平台。平台包括信号采样模块、控制运算单元、输出执行模块及监测记录系统，能够模拟实际电网运行环境下的多种干扰条件。测试依据IEC 61000-4系列标准，覆盖静电放电、浪涌冲击、电快速脉冲群、电磁辐射等典型干扰源。试验采用逐级叠加法，即在干扰等级逐步提升的条件下，对装置动作时间、误动率与恢复特性进行综合评估。为确保数据的准确性，测试过程设置多通道监测系统实时采集关键参数，并利用高精度示波器记录瞬态响应波形。不同干扰类型下的响应结果经过统计分析 with 重复验证，形成装置抗干扰性能曲线。该平台能够在实验室条件下再现复杂电磁环境，为抗干扰结构设计和参数优化提供可靠依据，也为后续标准化测试方法的建立奠定了技术基础。

5.2 实验结果与数据分析

实验结果表明，经电磁屏蔽、滤波及接地系统优化后的继电保护装置，在多类电磁干扰条件下均表现出良好的抗扰性能。具体而言，在 $\pm 4\text{kV}$ 静电放电测试中，装置输入输出信号稳定，无逻辑误触发现象；在 2kV 电快速脉冲群干扰下，采样误差控制在0.2%以内。浪涌冲击实验中，保

护逻辑响应延迟不超过2ms，误动作率下降至0.05%，较传统设计降低约80%。采用双通道冗余采样与软件滤波协同机制的装置，在 10V/m 电磁辐射环境下依然能准确判定故障类型并输出正确动作指令。数据统计显示，优化后系统输出信号稳定性提升约25%，故障检测精度提高至99.7%。对比分析验证了硬件电磁兼容设计与软件容错算法的协同作用能够显著提升系统整体抗干扰水平。

5.3 工程应用与验证结论

所提出的抗干扰设计方案在220kV变电站二次系统中进行了长周期工程验证。装置在实际运行环境中经受了雷击、电网操作波及高频通信干扰等多重考验，连续运行一年无误动与拒动记录。监测数据显示，装置在强干扰时段的信号波动小于2%，系统可靠性达到99.9%，远高于行业平均水平。现场测试进一步验证了硬件屏蔽、接地分区与软件算法相结合的多层防护体系在复杂环境下的稳定性与实用性。通过工程数据回溯分析发现，该设计有效降低了电磁耦合路径的影响，提高了抗干扰裕度，为后续智能继电保护装置的标准化和智能化升级提供了技术支撑。研究成果证明，多层次抗干扰结构在电力系统中具有可复制性与推广价值，对提升电网自动化设备的安全性与可靠性具有重要工程意义。

6 结语

电气二次继电保护装置的抗干扰设计是电网安全运行的重要技术保障。本文通过硬件屏蔽、信号隔离、滤波控制及软件容错等多层次设计，建立了完整的抗干扰体系。实验验证表明，硬件电磁兼容结构与自适应算法的协同优化，显著提升了装置在复杂电磁环境中的稳定性与动作精度。未来，随着电力系统智能化和网络化水平的提高，继电保护装置的抗干扰设计将向智能识别与自学习方向发展。结合AI算法的自适应干扰检测、云端容错诊断及协同防护网络，将成为提升电网韧性的新路径。抗干扰性能的持续优化，不仅是电气二次系统技术进步的标志，更是智能电网安全可靠运行的核心支撑。

参考文献

- [1] 洪灿桂.浅谈电气二次回路的干扰与抗干扰[J].企业技术开发, 2012,31(26):89-91.
- [2] 闫强强.电力系统中的电气二次与继电保护研究[J].科技资讯, 2024,22(06):92-94.
- [3] 王小周.探讨电力系统中的电气二次及继电保护[J].电子世界, 2017,(03):159-160.
- [4] 孙浩.干扰对于继电保护设备安全运行的影响及预防[J].电站系统工程,2011,27(02):73-74.