

变电站二次回路抗干扰设计与现场实施要点研究

巩璐 李铁 赵国辉

河南平高通用电气有限公司 河南 平顶山 467000

【摘要】：在复杂电磁环境中，二次回路的抗干扰能力直接影响变电站保护与自动化系统的运行稳定性。围绕关键薄弱环节，需从信号路径规划、屏蔽与接地策略、装置间隔布置、电磁场约束措施以及现场校核方法等方面形成协调体系。现场实施阶段的布线方式、金属连接结构、回路测试流程及动态干扰排查手段对最终效果具有决定性作用。通过在设计与施工两阶段保持目标一致性，可有效降低外界电磁扰动、开关操作冲击、电流互感器磁饱和及接地电位反击等因素造成的误动作风险，使二次回路具备稳定运行的能力，为变电站自动化平台提供可靠信号支撑，并在多场景运行条件下维持连续性与准确性。

【关键词】：变电站二次回路；抗干扰；接地与屏蔽；电磁环境；现场实施

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.060

引言

二次回路承载着保护、测量与控制的核心功能，其稳定性在多变电磁环境中愈加突出。现场运行经验不断揭示出多种潜在干扰路径，使信号畸变、逻辑异常与装置误动作时有发生。随着智能化设备密度提升与站内功率等级扩大，传统抗干扰思路已难完全适应新的运行条件。如何让设计逻辑和施工细节保持一致，使信号链路在强电磁背景下依旧保持清晰可靠，成为当前关注焦点。围绕这些关键问题展开探讨，有助于在设计环节消除隐患，在实施阶段巩固稳定特性，使回路具备更强承受能力并适应严苛运行场景。

1 二次回路干扰隐患的主要表现

1.1 信号畸变引发的识别偏差

二次回路在复杂电磁环境中运行时，信号波形极易受到外界干扰影响，电压与电流量测链路出现失真现象，使采集装置对真实状态的判断出现偏移。当开关设备产生高频分量或线路附近存在强磁场时，二次信号的幅值、相位或频率会被扰动，保护装置内部算法在处理这些异常波形时，很容易被引导至错误逻辑分支。继电器、测控单元或同步模块在遭遇畸变信号后，原有阈值区间难以准确区分正常扰动和实际故障，导致保护判据呈现不稳定状态^[1]。随着站内智能设备数量不断增加，信号链路复杂度不断扩大，耦合路径增多，使畸变问题更加隐蔽，外界不易察觉。一旦偏差积累至触及动作判据的程度，就会引发保护跳闸异常、遥测显示漂移或告警频繁闪动，给运行带来明显干扰。

1.2 保护链路受扰的潜在风险点

保护链路涉及电流、电压采集、逻辑运算以及出口执行多个环节，任何一个节点受到干扰都会引发一连串连锁反应。高压侧开断操作产生的瞬态过电压、电磁感应干扰和接地电位突变，都可能沿着辅助电缆、装置外壳或屏蔽层传递至保护装置内部，使判断条件出现错判。弱电信号在长距离路径上传输时，更容易受到邻近强电流回路的脉冲冲击，逻辑量输入输出板卡

在遭遇此类干扰后，会出现抖动、间歇性丢量或信息延迟，影响保护链路的连贯性。对差动保护、距离保护等依赖高精度测量的功能而言，干扰造成的细微误差也可能放大成动作误差，甚至引发异常出口。部分老旧站所使用的混合布线结构与不够严密的接地系统，使这些风险点更加突出，运行人员在日常巡检中常常难以准确定位干扰源头，提升了链路不稳定的隐患程度。

1.3 装置间互相耦合的干扰路径

二次回路内部的装置往往密集布置在同一屏柜或相邻机架中，导线数量多、路径交叉频繁，如果缺少合理规划，极易形成耦合干扰。强电回路产生的磁场会在相邻弱电导线中感应出附加电压，使信号基准发生偏移。不同系统之间的屏蔽层若存在连接不当、跨屏柜接地方式不一致，也会产生环流路径，使干扰在屏间传播。部分测控装置在执行高速开关指令时，会形成陡峭边沿的脉冲信号，若布线紧邻采样链路，就会向采样电路注入干扰能量，导致测量值波动。随着装置功能集成度提高，内部电路密度不断增加，高速数字信号与模拟信号并行存在，使内部耦合路径更加复杂。一旦这些耦合效应与外界电磁干扰叠加，二次回路中的信号链路就会表现出不可预测的扰动，现场排查难度明显增加，体系整体稳定性受到影响。

2 复杂电磁环境下的干扰成因剖析

2.1 开关操作产生的瞬态冲击

开关设备在投入或开断过程中，会在极短时间内形成高幅值瞬态电压与电流，这些波形往往包含丰富的高频成分，能够沿母线、金属支架及电缆屏蔽层高速传播。瞬态冲击不仅影响一次设备周边的磁场分布，也会跨越多条二次路径进入信号回路，使测量链路呈现突发性干扰^[2]。保护装置对突变信号十分敏感，一旦电流或电压采样在瞬态过程中出现尖峰，就可能触及敏感阈值，使逻辑判断进入异常区间。部分站内设备使用较长辅助电缆或复杂敷设结构，也会使瞬态能量产生反射与叠加，进一步扩大冲击范围。当多类设备同时存在操作动作时，

瞬态效应呈现多点叠加特性，使二次回路的抗扰能力面临更高挑战。

2.2 电磁辐射与感应耦合形成的影响

高压设备在运行中会产生持续性电磁辐射，特别是在大电流通过导体或绝缘结构局部产生电晕时，辐射场强显著提升。二次回路中的测量导线、通讯链路及弱电装置在此背景下容易受到感应耦合影响，信号中混入附加成分，使数据处理逻辑变得不稳定。线缆之间若并行距离过近，会放大耦合效应，使干扰沿线路传播至多个装置，引起多点同步异常。部分数字化设备内部含有高速时钟电路，高频切换过程本身也会扩散电磁能量，叠加外部辐射后，使系统环境更为复杂。站内布置密度越高，导线分布越集中，耦合路径越难以完全隔离，使电磁辐射带来的影响持续放大，并对保护与测控链路的稳定性提出更高要求。

2.3 接地电位波动带来的链路干扰

变电站中存在多种接地系统，一旦短时电流突增或外部故障造成地网电位变化，二次回路中的参考电位将随之波动，使信号基准不再稳定。保护装置、测控单元以及通讯设备依赖统一电位来维持判断准确性，电位差若在不同装置之间形成，就会使输入输出信号的边界特性发生偏移。大范围金属结构之间若存在接地不一致，更可能形成环流，使干扰沿屏柜、桥架及屏蔽层传播，影响多个回路。接地电阻变化、地网老化或多点接地混杂，也会增强电位波动幅度，使弱电链路出现不可预测的抖动。部分站内长距离电缆受地电位反击影响更为明显，在故障瞬间会产生感应电压，使回路中的数字信号出现错码或丢帧，从而影响系统稳定运行。

3 抗干扰设计的关键控制策略

3.1 屏蔽与接地体系的协调布置

抗干扰设计中，屏蔽方式与接地结构的协调关系十分关键。金属屏蔽层、机柜壳体及桥架在形成整体屏障时，需要保持电位路径的连续性，使干扰能量被有效引导并释放。若屏蔽层在多个位置出现不一致连接或断点，会造成反射与环流，使干扰沿着不预期的方向进入二次链路。接地方式选择同样影响屏蔽效果，单点接地能够减少地环流，而多点接地则适用于大面积设备分布，但必须确保电位保持一致^[3]。装置外壳、信号屏蔽层和金属构件之间的连接关系一旦配置不当，就可能引发干扰能量叠加，使弱电信号在传输中出现波形异常。通过在站内形成明确的接地分区，让屏蔽体系在统一电位下工作，可使干扰衰减路径更加清晰可靠，从而提升二次回路的整体稳定性。

3.2 回路结构与路径规划的优化

二次回路抗干扰能力在很大程度上取决于线路结构的合理性以及路径规划的清晰程度。弱电信号在长距离传输时容易

受到电磁耦合影响，因此路径应避免开强电电缆、开关设备和电流突变区域，并通过合理的桥架分层和导线分区减小感应范围。路径中若存在频繁交叉、急弯或重复绕行，会放大分布参数效应，使信号衰减或易受耦合干扰。线缆敷设过程中保持信号对线的完整性、减少屏蔽层破损与开裂，可降低外部干扰进入的概率。部分保护回路对对称度和阻抗匹配要求较高，在设计阶段就需要确保路径一致，避免因阻抗不平衡造成采样误差。通过对全站回路进行前期规划，使采样链路、控制链路及通信链路分区独立，可形成更加清晰可靠的信号通道，有效降低干扰风险。

3.3 装置间隔与导线配置的约束要点

屏柜内部装置的间隔布局与导线配置方式直接影响干扰传播路径。高频逻辑装置、强电驱动部件与敏感采样模块若布置过于紧密，会形成耦合源与受扰目标的重叠区域，使弱电链路在毫秒级时间内遭受突发性干扰。通过在屏内设置物理隔板、功能分区及最小间距限制，可降低不同系统之间的耦合效应。导线配置方面，强弱电需分层布放，控制线与采样线避免并行过长，必要时增加独立管道或金属隔离结构。线缆扎束过紧或走向混乱会改变电气间距，使回路更易受脉冲干扰影响。对高灵敏度回路的导线，应保持对绞结构与屏蔽层完整性，并确保端部处理规范。通过对间隔、层次和走向进行约束，可让装置间的电磁关系更为可控，使二次回路在复杂环境中维持稳定状态。

4 现场实施中的稳定性强化措施

4.1 布线与金属连接结构的规范细化

现场实施阶段往往决定二次回路抗干扰能力的实际表现，布线方式与金属连接结构的处理质量直接影响系统稳定性。若线缆走向紊乱、强弱电混放或屏蔽层未按要求处理，干扰能量就会出现多路径传播，使信号链路暴露在高敏感环境中。通过对桥架分层布置、线束分区管理和金属连接点的完整性检查，可让电磁场分布更加可控^[4]。屏蔽层接点若处理不当，会形成局部反射或电位差，使干扰能量持续积累，因此端接位置和压接工艺必须保持统一标准。设备之间的金属连接若存在松动或接触不良，也会为环流提供通道，使干扰在屏柜间传播。通过对敷设细节严格把控，使布线结构与金属框架形成稳定的整体屏障，有助于提升二次系统的抗扰能力。

4.2 动态干扰排查与校核流程

运行现场的干扰形式多变，需要通过动态排查方式识别隐蔽问题。在装置通电、回路带载以及开关切换等不同状态下进行信号监测，可捕捉到瞬时耦合、脉冲干扰及电位波动等现象，并通过对比分析找出干扰源的活动规律。部分干扰在静态条件下并不明显，但在操作时会呈现短时爆发，因此动态监测能够揭示回路真正的受扰路径。对采样链路、通讯链路和出口链路

逐一校核,可及时发现逻辑抖动、波形跳变或数据失真,并评估干扰对动作逻辑的影响程度。若监测过程中发现异常,可结合装置事件记录和波形捕捉数据进行定位,使问题环节在施工阶段得到修正。通过持续性排查和对比校核,使二次回路在不同运行条件下均保持稳定输出。

4.3 关键节点的运行验证与调试步骤

在现场实施过程中,对关键节点进行运行验证是确保抗干扰能力落地的核心步骤。二次回路中的采样端子、出口触点、接地节点和屏蔽端接位置等部位都需在实际运行环境中进行响应测试,确认信号幅值、相位及数据传输质量是否满足要求。调试过程中,通过模拟负荷、切换操作和扰动注入等方式观察装置的响应特性,在不同工况下检验链路稳态与瞬态行为。若在测试中出现跳变或波形失真,可立即调整路径、接地方式或屏蔽处理,使问题在早期得到修正。关键节点验证不仅关注单点性能,也重视各部分之间的协同表现,确保回路在联动条件下仍具备稳固特性。通过完整的调试流程,使设计阶段的抗干扰策略在现场得到有效呈现,保证系统运行时保持可靠状态。

5 抗干扰整体成效的归整与提升方向

5.1 设计与施工一致性的强化点

二次回路的抗干扰能力在很大程度上取决于设计意图与现场实施之间的一致程度。若设计阶段预设的屏蔽方式、接地策略和导线走向在施工过程中出现偏差,抗干扰结构就难以形成完整体系。通过在项目实施中构建清晰的技术交底流程,让设计图纸中的接地分区、布线原则和装置间隔得到严格执行,可避免现场因空间限制、施工习惯或材料差异引发的随意调整^[5]。对重要节点实施复核机制,使屏蔽端接、接地连通性、路径独立性等关键细节与设计要求保持一致。设备选型、配线工艺和金属连接结构若与设计方案的抗干扰模型偏离,系统的稳定性就会受到影响。通过强化全过程的技术一致性管理,使抗干扰能力在现场得以真实呈现,并在运行阶段保持预期的可靠水平。

参考文献:

- [1] 毛孙迪,张寅帅,吴小乐,等.变电站二次回路数字化建模技术研究[J].农村电气化,2026,(01):69-72.
- [2] 张旭,高璠.变电站二次回路及继电保护调试技术探讨[C]//中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网(苏州)城市能源研究院.2025年(第三届)城市电网技术创新会议论文集.内蒙古电力集团乌海供电公司,;2025:908-910.
- [3] 郑健,王颜林.变电站二次回路及继电保护调试技术分析[J].电气技术与经济,2025,(07):332-334.
- [4] 杨明飞.变电站二次回路抗干扰措施分析与改进[J].电力设备管理,2025,(13):22-24.
- [5] 孙应春,顾中一,邱慧,等.基于数字孪生技术的变电站二次回路设计创新[J].粘接,2025,52(07):183-185.

5.2 运行表现中暴露问题的再处理

二次回路在投入运行后,设备间耦合关系、电磁环境分布及负荷变化情况会不断演变,一些隐性干扰点会逐渐显现。通过对装置告警、波形记录和逻辑动作过程的长期观察,可识别出异常跳变、间歇性干扰或数据漂移等迹象,借此判断干扰源的活跃特性。现场运行人员可结合事件序列与多点监测结果对回路进行再评估,找出屏蔽不连续、接地电位不稳定或路径耦合过强等问题。若发现受扰节点,可通过优化布线、调整装置间距、重新压接屏蔽层或改善接地结构等方式进行修正,使原有隐患得到控制。

5.3 体系化抗干扰水平的持续提升方式

提升二次回路的抗干扰水平不仅依赖单点优化,更需要形成体系化的长期策略。通过构建涵盖设计、施工、调试与运行的闭环机制,可让每个阶段产生的经验与问题被有效记录并反哺前期设计,使抗干扰措施不断完善。站内的电磁环境可随负荷扩容、设备增设或结构调整而变化,因此在运行周期中开展定期电磁评估,可识别出新的干扰源或环境变化趋势。新型屏蔽材料、数字化测量技术和抗干扰装置的逐步应用,也为二次回路优化提供更多可能。通过在工程实践中持续引入先进工艺和改进策略,使系统抗扰能力在不同运行条件下保持稳固,并具备应对复杂环境变化的能力,从而构建更具韧性的二次回路防护体系。

6 结语

在二次回路长期运行过程中,电磁环境的多样性不断考验着系统的稳定承受能力。干扰源的隐蔽性与传播路径的复杂性,使设计、施工与运行阶段必须保持紧密衔接。抗干扰措施只有在结构布局、路径控制、接地处理与现场验证形成统一体系后,才能在强电磁背景下保持可靠表现。多角度的持续优化让二次回路在多变工况下仍具备稳固特性,为保护与自动化链路奠定坚实支撑。