

智能避雷器与隔离开关联动运行技术规范

黄玉任

国网湖北省电力有限公司来凤县供电公司 湖北 恩施 445700

摘要：随着智能电网发展，传统一次设备智能化升级势在必行。避雷器与隔离开关长期独立运行，已难以满足现代变电站对自动化、状态检修和快速故障隔离的需求。本文聚焦“智能避雷器与隔离开关联动运行”这一前沿方向，构建系统性技术规范体系。文章阐明了联动运行在提升系统可靠性、优化运维及保障人身安全方面的核心价值，提出整体架构，并从功能要求、性能指标、信息交互、机械电气接口、控制逻辑、安全防护和试验验证七个维度详述关键技术规范。特别强调基于IEC 61850标准的信息模型、高可靠联动闭锁逻辑及全生命周期状态监测机制。该规范为设备研发、制造、试验与工程应用提供统一技术依据，支撑一键顺控、自动故障处置等高级功能落地，对推动电力系统智能化具有重要理论与实践意义。

关键词：智能避雷器；隔离开关；联动运行；技术规范

引言

电力系统是国家关键基础设施，其安全稳定运行关乎国计民生。金属氧化物避雷器（MOA）用于限制过电压、保护设备绝缘，隔离开关则提供明显断开点以保障检修安全。传统上二者功能独立、信息割裂，难以协同。在智能电网加速建设背景下，国家电网与南方电网相继提出“坚强智能电网”和“数字电网”战略，强调设备状态全面感知、信息互联互通与智能决策。实现一次设备间的协同联动，成为提升变电站智能化水平的关键。智能避雷器与隔离开关联动正是这一理念的实践：通过在避雷器集成高精度传感器与智能电子装置（IED），实时监测泄漏电流、温度等状态参数，并经IEC 61850等标准通信网络将数据共享至隔离开关智能终端。当避雷器出现严重劣化或故障时，系统可自动闭锁相关隔离开关操作，防止带隐患倒闸，避免事故扩大；反之，隔离开关位置也可辅助判断避雷器工况。然而，当前行业缺乏统一的技术规范，导致设备接口、协议与逻辑不兼容，制约互操作性与工程标准化。因此，制定《智能避雷器与隔离开关联动运行技术规范》具有迫切现实需求和意义。

1 联动运行的技术内涵与价值

1.1 技术内涵界定

智能避雷器与隔离开关联动运行，是指在数字化变电站环境下，通过信息共享与逻辑协同，使两者在特定工况下形成有机整体的一种运行模式。其技术内涵首先体现在感知层面，即智能避雷器需具备对自身核心状态参量的在线、高精度、宽频带监测能力，并能对异常状态进行初步诊断。其次，在通信层面，双方需通过符合

IEC 61850等国际标准的通信网络，实现状态信息、控制命令的可靠、实时、标准化交互。最后，在逻辑层面，整个联动体系依赖于在变电站自动化系统（SAS）或间隔层智能终端中预置的明确联动控制逻辑，该逻辑能够根据避雷器的健康状态，自动生成对隔离开关的闭锁或告警指令，从而完成从感知到执行的闭环。

1.2 核心价值分析

一是提升系统安全可靠：这是最根本的价值。避雷器故障（尤其是爆炸）往往具有突发性和破坏性。联动闭锁机制能在故障发生前或初期就阻止相关操作，有效防止因误操作引发的母线失压、设备连锁损坏等重大事故，将风险控制最小范围内。二是赋能状态检修与预测性维护：联动系统提供的丰富状态数据，使得对避雷器的运维模式可以从传统的定期检修转变为基于状态的检修（CBM），乃至预测性维护（PdM）。运维人员可以根据避雷器的实时健康指数，精准安排检修计划，优化资源配置，降低运维成本^[1]。三是保障人身作业安全：在检修作业前，若系统检测到避雷器存在隐患，可强制闭锁接地开关的合闸操作，或发出最高级别告警，提醒工作人员采取额外的安全措施，从根本上杜绝了因避雷器残余能量或潜在故障对现场人员造成的伤害。四是支撑高级自动化应用：联动运行是实现变电站“一键顺控”、“自动故障隔离与恢复”等高级功能的重要基础。一个可靠的联动系统，可以为这些自动化程序提供准确的设备状态判据，使其决策更加安全、可靠。

2 联动运行系统总体架构

一个完整的智能避雷器与隔离开关联动运行系统，应采用分层分布式架构，主要包括以下组成部分：（1）

智能避雷器单元：由本体避雷器、集成式多参量传感器（电流、电压、温度、局放等）、信号调理单元、本地智能处理单元（IED）构成。IED负责数据采集、预处理、状态诊断，并通过通信接口上送信息。（2）智能隔离开关单元：由本体隔离开关、电动操作机构、位置传感器（分/合/中间位）、辅助触点、以及智能终端（通常与断路器共用或独立配置）构成。智能终端接收并执行来自上级的控制与闭锁命令。（3）通信网络：遵循IEC 61850-9-2（采样值SV）和IEC 61850-8-1（通用面向对象变电站事件GOOSE）标准，利用变电站内已有的站控层网络（MMS）和/或过程层网络，实现两个智能单元之间以及与站控层后台之间的高速、可靠通信^[2]。（4）站控层系统：包括监控主机、操作员站、工程师站等。它不仅是人机交互的窗口，也是联动逻辑的主要承载者。系统数据库中需配置联动规则，并能实时显示联动状态，记录所有操作与告警事件。

3 关键技术规范详述

3.1 功能要求

智能避雷器单元应能对全电流、阻性电流基波及各次谐波分量、有功功率损耗、等效频率、表面及内部温度等关键参数进行连续、高精度的在线监测。在此基础上，其内置的智能电子装置（IED）需运行状态诊断算法，能够依据监测数据对避雷器的健康状况进行分级评估（如正常、注意、异常、严重），并生成相应的告警信号。当避雷器状态恶化至预设的“严重”或“危急”阈值时，IED必须能够通过硬接点（继电器输出）和软报文（GOOSE）两种方式，向相关隔离开关的智能终端发送“联动闭锁”信号，以确保命令的可靠传达。同时，所有原始监测数据、计算结果、诊断结论、告警信息及联动状态，都应通过MMS服务实时上送至站控层系统，供运行监视、历史记录和深度分析使用。此外，系统还应支持在故障排除后，通过站控层下发远方复归命令，以解除联动闭锁状态，恢复正常操作权限。

3.2 性能指标

在监测精度方面，阻性电流和有功功率损耗的测量相对误差均不应大于 $\pm 5\%$ ，温度测量误差不应大于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。在响应速度上，从避雷器状态越限到发出联动闭锁信号的总响应时间，包括诊断计算和通信传输在内的全过程，不应超过100毫秒，以满足电力系统快速保护的要求。通信的可靠性至关重要，GOOSE报文的传输丢包率必须控制在0.001%以下，以保证闭锁命令的绝对可靠送达。此外，智能单元本身必须具备强大的环境适应能力，其电磁兼容性需满足GB/T 17626系列标准中关于变

电站严酷环境的要求，并能在 -40°C 至 $+85^\circ\text{C}$ 的宽温范围内长期稳定工作，同时具备不低于IP54的防尘防水等级。

3.3 信息交互规范

整个联动系统必须严格遵循IEC 61850标准，为智能避雷器和隔离开关分别建立规范的逻辑设备（LD）和逻辑节点（LN）信息模型，例如避雷器可建模为ARCO或自定义LN，隔离开关则建模为XSWI。所有关键状态量应被组织成数据集（DataSet），并通过无缓冲报告或GOOSE机制进行周期性或事件触发式的上送。特别是用于传输联动闭锁信号的GOOSE控制块，其APPID、VLAN ID、优先级等网络参数必须在系统配置描述（SCD）文件中明确定义，以确保其在网络中的唯一性和高优先级传输^[3]。作为软件通信的冗余备份，系统还必须提供至少一副独立的硬接点输出，其电气容量需足以驱动隔离开关操作回路中的闭锁继电器，从而在通信网络完全失效的极端情况下仍能保障基本的闭锁功能。

3.4 机械与电气接口

在物理实现层面，机械与电气接口的设计直接关系到系统的安全与稳定。用于监测避雷器接地电流的传感器，应采用高精度、宽频带的穿心式罗氏线圈或零磁通电流互感器，并牢固安装于避雷器接地线上，其安装方式绝不能影响避雷器本身的泄流性能和机械结构强度。智能单元的供电宜采用站内标准的DC 110V/220V直流电源，并配备完善的电源滤波、防反接及过压保护电路。所有智能单元的外壳、内部电路的屏蔽层以及传感器的二次侧，都必须通过低阻抗路径可靠连接至变电站的主接地网，其接地电阻需符合相关设计规范，这是防止电磁干扰和保障人身安全的基本要求。

3.5 联动控制逻辑

应明确规定触发联动闭锁的具体条件，这些条件应是多维的、经过充分验证的，例如“阻性电流持续超过额定值的200%达10分钟”或“内部温度骤升并超过 120°C ”。逻辑设计需精确指定被闭锁的对象，通常涵盖与该避雷器直接电气相连的线路隔离开关、母线隔离开关以及接地开关。闭锁作用应覆盖隔离开关的所有操作模式，包括就地手动、远方遥控和顺控操作，通过切断其合闸与分闸回路来实现物理上的操作禁止。为了进一步提升可靠性，建议采用双重化逻辑设计，即在站控层和间隔层同时部署联动逻辑，站控层侧重于全局监视与事件记录，而间隔层则专注于毫秒级的快速执行，两者相互校验，共同构筑安全防线。

3.6 安全与防护

在网络安全方面，所有对外通信接口必须支持访

问控制列表 (ACL)、报文完整性校验乃至加密 (如 MACsec) 等措施,以抵御非法入侵和恶意网络攻击。在防误动设计上,联动逻辑应引入必要的延时确认机制和多判据融合策略,例如要求电流异常与温度异常同时出现才触发闭锁,以此规避因单一传感器故障或瞬时电磁干扰导致的误动作。尽管自动化是目标,但必须保留紧急情况下的手动干预能力^[4]。因此,系统应允许授权人员通过物理钥匙或高权限密码,在隔离开关的就地操作机构上进行手动解锁,但此类高风险操作必须被系统强制记录并立即上报至站控层,以便事后追溯和审查。

3.7 试验与验证

严格的试验验证是确保联动系统从设计图纸走向可靠运行的关键环节。在型式试验阶段,除了常规的一次设备电气与机械试验外,必须增加针对联动功能的专项测试,包括模拟避雷器内部故障以验证闭锁响应时间、人为切断通信链路以测试硬接点后备功能的有效性,以及在强电磁干扰环境下考核联动逻辑的稳定性。出厂试验则要求对每一台设备进行完整的联动功能联调,确保其软硬件接口匹配无误,控制逻辑正确无误。最为关键的是现场验收试验 (SAT),在变电站正式投运前,必须进行全回路的联动传动试验,即从模拟避雷器状态异常开始,直至观察到隔离开关被成功闭锁为止,完整验证整个“感知-通信-决策-执行”链条的正确性、可靠性和时效性。

4 未来展望与发展趋势

智能避雷器与隔离开关联动运行技术,作为一次设备智能化的重要里程碑,其未来发展将呈现深度融合与智能化的趋势。未来的设备形态可能会朝着高度集成化的一体化智能组件演进,避雷器与隔离开关在物理结构和电气设计上将更加紧密地结合,从而减少外部接口,提升整体可靠性。人工智能技术将被深度赋能于该领域,通过对海量历史监测数据的机器学习,构建出更为精准的避雷器剩余寿命预测模型和早期故障预警模型,使联动逻辑从简单

的“阈值触发”模式,进化为基于风险概率的“智能预测”模式。数字孪生技术的应用也将成为可能,在变电站的虚拟镜像中同步构建联动系统的数字模型,实现对物理设备状态的实时仿真、故障情景预演以及最优运维策略的推演。最终,随着技术的成熟和应用的普及,一套涵盖设计、制造、试验、运维全链条的、完善的国家标准和行业标准体系将逐步建立,为这项技术的健康发展和规模化推广提供坚实的制度保障。

5 结语

智能避雷器与隔离开关联动运行技术,是智能电网背景下一次设备智能化、协同化发展的必然产物。本文所提出的《智能避雷器与隔离开关联动运行技术规范》,系统性地涵盖了从系统架构到具体技术指标的全方位要求,旨在为该技术的健康发展提供清晰、统一、可操作的指导。通过严格执行本规范,可以有效解决当前存在的设备异构、接口不一、逻辑模糊等问题,确保联动系统的高可靠性、高安全性和高互操作性。这不仅能够显著提升单个变电站的运行安全水平和运维效率,更能为构建更加坚强、智能、自愈的未来电网奠定坚实的物理基础。随着相关技术的不断迭代和标准体系的日益完善,智能联动必将成为新一代电力设备的标准配置,引领电力系统向更高层次的智能化迈进。

参考文献

- [1]吴迪,潘建乔,陈超,等.基于智能避雷器的状态感知技术在配电网中的应用[C]//浙江省电力学会2020年度优秀论文集.国网浙江平湖市供电公司,2021:49-53.
- [2]李飞龙.配电线路避雷器带电智能安装装置研制[D].合肥工业大学,2025.DOI:10.27101/d.cnki.ghfgu.2025.001840.
- [3]黄继来,曹辉,周辽,等.智能电网中避雷器无线测试装置的优化设计[J].电气时代,2025,(08):78-80.
- [4]陈勇旭.500 kV避雷器智能在线监测的设计应用[J].水电站机电技术,2024,47(08):40-42.