电气自动化中电气接地及电气保护技术

黄紫维
广东雷能电力集团有限公司　广东　湛江　524000

摘　要：随着工业自动化的快速发展，电气自动化系统在各行业广泛应用，其安全稳定运行至关重要。本文围绕电气自动化中电气接地及电气保护技术展开研究。首先分析电气自动化系统的构成、电气特性与安全需求，包括设备、人员及系统运行三方面安全需求。接着探讨电气接地关键技术，涵盖设计、施工与测试及动态监测技术。然后阐述主流电气保护关键技术，涉及与系统的协同机制及过电流、过电压等保护技术。最后研究两者在自动化系统构建、运行维护及技术演进中的协同应用，为电气自动化系统的安全稳定运行提供技术参考。

关键词：电气自动化；电气接地技术；电气保护技术；协同应用

引言

电气接地及电气保护技术是保障电气自动化系统安全的核心。当前系统高集成度、强关联性等特性带来诸多挑战，设备故障、人员触电等风险不容忽视。本文旨在深入研究这些技术，分析系统电气特性与安全需求，探索接地和保护关键技术及其协同应用，以提升系统可靠性，满足工业生产对自动化系统的严苛要求。

1 电气自动化系统的电气特性与安全需求

1.1 电气自动化系统的构成及电气特性

电气自动化系统是由多种电力电子设备与控制单元构成的复杂网络，其核心组件包括可编程逻辑控制器（PLC）、变频器、伺服电机、传感器、人机界面（HMI）及工业总线系统等。这些设备通过电缆连接形成联动机制，呈现出显著区别于传统电气系统的特性。高集成度与强关联性是其首要特征。现代自动化系统常采用模块化设计，数百个甚至数千个节点通过工业以太网或PROFINET等总线协议实时通信，某一设备的电气异常可能通过信号链路引发连锁反应。宽频带与多干扰源并存同样突出。系统中既有50Hz工频电流，也有变频器产生的kHz级开关频率，还有无线通信模块的MHz级电磁辐射。这些不同频率的电气信号在密集布线环境中易形成耦合干扰，尤其在化工、冶金等工业场景中，高温、粉尘等环境因素会加剧设备绝缘老化，进一步放大信号失真风险。快速动态响应需求对电气特性提出严苛要求。伺服系统为实现毫秒级定位精度，需频繁进行电流调节，导致回路中出现陡峭的电流变化率（di/dt），可能在接地回路中感应出瞬时过电压，影响控制单元的稳定运行。

1.2 电气自动化系统的安全需求

电气自动化系统的核心安全需求如下：（1）设备安全防护是保障系统存续的基础，自动化系统中，PLC、DCS等控制单元多采用微处理器芯片，其耐压能力通常低于50V，若遭遇雷击浪涌或接地故障引发的过电压，极易造成芯片烧毁。电机、变压器等大功率设备若长期处于过电流状态，绝缘层会因过热碳化，最终引发短路事故。（2）人员安全保障是电气自动化系统的底线要求，系统中裸露的导电部件（如电机外壳、电缆桥架）若因绝缘损坏带电，可能导致操作人员触电。尤其在潮湿的食品加工车间或存在金属粉尘的机械加工环境中，人体电阻显著降低，即使36V以下的安全电压也可能造成致命伤害。数据显示，工业触电事故中，70%源于设备保护接地失效或漏电保护装置未及时动作。（3）系统稳定运行需求直接关系到自动化效能的发挥，接地不良会导致信号参考电位漂移，使传感器测量误差增大。同时保护装置的误动作或拒动会扩大故障影响范围，如变电站自动化系统中，继电保护若未能快速切断短路故障，可能引发母线电压崩溃，导致区域电网瘫痪[1]。

2 电气自动化中电气接地关键技术

2.1 电气接地系统的设计关键技术

电气接地系统的设计需以系统电压等级、设备类型及环境参数为基础，构建兼具可靠性与抗干扰性的技术方案，具体技术如下，（1）接地类型的适配选择，工作接地需根据系统中性点运行方式确定，中性点直接接地系统中，接地电阻需控制在4Ω以下，以保障零序电流保护的灵敏度；而中性点非有效接地系统则需通过消弧线圈补偿接地电容电流，降低弧光接地过电压风险。保护接地需覆盖所有外露导电部分，包括设备金属外壳、电缆桥架等，其接地支线需采用铜芯绝缘导线，截面积根据设备额定电流的1/3选取，确保故障电流能有效触发保护装置。屏蔽接地需区分信号类型，低频模拟信号采用单端接地，高频数字信号采用多点接地，避免形成接地环路引发

干扰。（2）接地网的拓扑设计需兼顾散流效率与抗干扰性，大型自动化车间多采用网格状接地网，水平导体选用40×4mm扁钢或φ12mm圆钢，网格间距控制在5-10m，通过多点并联降低整体接地电阻。垂直接地极可采用60×60×2500mm角钢，间隔5m布置，顶部埋深不小于0.8m，与水平导体采用放热焊接连接，确保接头接触电阻小于0.03Ω。对于高土壤电阻率区域（ρ＞100Ω·m），可采用换土法（替换为ρ＜50Ω·m的细土）或电解离子接地技术，通过向土壤注入电解质降低局部电阻率。（3）抗干扰接地技术需针对自动化系统的信号特性设计，PLC控制柜内设置独立接地汇流排，模拟量模块接地与数字量模块接地分开敷设，汇流排与接地网单点连接，避免不同信号回路的地电位差产生干扰。变频器接地需采用短粗铜缆（截面积≥16mm²），长度控制在2m以内，并与电机接地形成闭合环路，减少高频谐波对外泄放路径。

2.2 电气接地系统的施工与测试技术

接地系统的施工质量直接影响其性能，需通过标准化工艺与精准测试确保技术指标达标。（1）施工工艺控制要聚焦关键节点处理，接地体敷设前需清除地表杂物，保证与土壤紧密接触，垂直接地极采用机械压入法施工，避免锤击导致角钢弯曲影响散流效果。水平导体焊接时，搭接长度不小于扁钢宽度的2倍或圆钢直径的6倍，双面施焊确保焊缝饱满，焊后涂覆沥青漆防腐，埋地部分需包裹300mm厚素土回填。电缆沟内接地干线需与动力电缆、控制电缆分层敷设，间距不小于150mm，交叉处采用绝缘隔板隔离，防止电磁耦合。（2）接地电阻测试技术要采用科学方法消除环境干扰，使用四极法测量接地电阻时，电流极与电压极间距分别为接地网对角线长度的4倍和2倍，测试仪器选用精度0.01Ω级的接地电阻仪，在不同时段（如晴天、雨后）多次测量取平均值。对于复杂接地网，需采用异频法测试，通过向接地网注入128Hz异频电流，规避50Hz工频干扰，确保测量误差小于5%。跨步电压与接触电压测试需使用专用电压探头，在接地网边缘2m范围内选取测试点，确保跨步电压≤70V、接触电压≤50V（持续时间≤5s）。（3）接地系统的动态监测技术，通过在接地网关键节点安装智能接地电阻传感器，采用LoRa无线通信实时上传数据，监测周期可设置为1小时/次，当接地电阻突变超过20%时自动报警。结合红外热像仪检测接地连接点温度，若某接头温度高于环境温度10℃以上，需及时排查是否存在接触不良问题[2]。

3 电气自动化中主流电气保护关键技术

3.1 保护技术与自动化系统的协同机制

电气保护技术需与自动化控制系统形成“感知-决策-执行”的闭环。保护装置通过高速采样模块获取电流、电压信号，经芯片处理提取故障特征量，再通过工业以太网传输至PLC。PLC将特征量与预设保护逻辑比对后，通过继电器输出模块驱动断路器动作，确保故障处理的连贯性。保护定值的动态调整是协同的核心。系统可依据设备运行状态自动改变保护参数，例如根据电机负载率调整过流保护定值，结合绕组温度修改过载保护阈值。

3.2 过电流保护的分层实现技术

过电流保护采用“速断-限时速断-过负荷”的三段式结构，通过参数配合实现选择性动作。速断保护基于电流瞬时值启动，整定电流按躲过被保护设备末端最大短路电流计算，可靠系数根据系统稳定性选取。限时速断保护的整定电流参考相邻下一级速断保护值确定，动作延时设定需保证故障切除范围最小。过负荷保护采用反时限特性曲线，动作时间随电流增大而缩短，与设备耐热特性相匹配。电机保护中需包含堵转保护功能，通过检测电流持续状态判断堵转，动作时先尝试通过变频器调整输出，若无效果则切断电源。堵转检测需排除启动阶段的正常大电流，可借助转速反馈信号辅助判断。

3.3 过电压保护的分级防护技术

过电压保护按能量等级分为外部防雷与内部过电压抑制。外部防雷由接闪器、引下线与接地网构成，引下线选用特定规格的热镀锌圆钢，确保与接地网连接可靠。配电系统入口安装T1级SPD，分配电柜设置T2级SPD，设备前端配置T3级SPD，各级SPD按能量承受能力分级抑制过电压。内部过电压抑制多采用氧化锌避雷器，其非线性电阻片在正常电压下呈高阻态，过电压时电阻骤降，将电压箝位至设备可承受范围。避雷器的持续运行电压和工频参考电压需与系统电压特性匹配。

3.4 差动与定向保护的精准实现

差动保护通过比较设备两侧电流差值识别内部故障，核心是减小不平衡电流影响。变压器差动保护需考虑电流互感器变比误差和接线组别差异，通过软件进行相位补偿。为避免励磁涌流误动，采用二次谐波制动，当谐波含量达到一定比例时闭锁保护。差动电流定值按躲过最大不平衡电流整定。定向保护通过功率方向元件判断故障方向，元件采用特定接线方式，设定动作边界角。为提高灵敏度，采用相电压补偿技术，在电压较低时自动投入记忆电压，确保方向判断准确。

3.5 接地故障保护的技术配置

接地故障保护根据系统接地方式采用不同方案。TN系统中，剩余电流保护器基于基尔霍夫电流定律检测剩

余电流，动作值按环境条件选取，分断时间需保障安全。IT系统通过绝缘监测装置检测对地绝缘电阻，低于阈值时发出告警，并可通过注入信号定位故障支路。高压系统接地保护采用零序电流互感器，保护定值按躲过正常运行时的最大不平衡电流设定，动作延时与过流保护配合以实现选择性。谐振接地系统中，需检测消弧线圈投入后的残流，判断故障性质并采取相应措施[3]。

4 电气接地与保护技术在自动化系统中的协用应用

4.1 系统构建时的协同规划要点

在自动化系统搭建阶段，接地网络的布局需与保护装置的特性参数形成预设匹配。接地极的材质选择与布置密度，应结合保护装置的动作灵敏度要求确定，例如在短路电流较大的回路中，接地极需采用耐腐蚀材料以保证散流稳定性，同时与过流保护的整定电流相适配。中性点的接地方式需关联零序保护的逻辑设计，当采用经电阻接地时，电阻值的选取要与零序保护的动作时限配合，确保故障电流在保护动作前处于可控范围。

保护装置的安装位置需考虑接地网的电位分布，避免因接地电位差过大导致装置误动。控制室内的保护屏应设置独立接地汇流排，汇流排与主接地网的连接点选择需远离大电流设备的接地极，减少干扰。屏蔽接地的线缆走向需与保护装置的采样线路保持安全距离，降低电磁耦合对保护精度的影响，尤其在高频设备集中区域，需采用分层接地与分区保护的协同方案。

4.2 日常运行中的协同维护方式

自动化系统运行期间，接地状态的监测数据需作为保护装置参数调整的依据。定期测量接地网的接地电阻时，需同步记录保护装置的动作记录，当接地电阻变化超过一定范围，应重新校验过电压保护的动作阈值。雷雨过后，需同时检查防雷接地的引下线连接状况与浪涌保护器的漏电流值，确保两者在防雷过程中协同有效。

保护装置的定期校验需结合接地系统的季节性变化，例如在土壤含水率较高的雨季，需适当降低接地故障保护的动作电流，补偿接地电阻下降带来的影响。建立接地故障与保护动作的联合分析机制，当发生保护误动时，除检查装置本身，还需测试接地回路的阻抗连续性，判断是否因接地不良导致的信号干扰。对重要负荷的保护装置，需与对应设备的接地支线进行联动测试，确保故障时电流路径与保护逻辑一致。

4.3 技术演进中的协同发展方向

随着自动化程度提升，接地与保护技术的协同需向智能化方向整合。在接地网中植入分布式光纤传感器，实时监测接地极的温度与电流分布，并将数据传输至保护装置的智能算法模块，实现保护定值的动态优化。当检测到某区域接地电流异常增大时，保护装置可提前调整动作策略，限制故障扩散范围。采用数字孪生技术构建接地-保护协同仿真模型，模拟不同工况下的接地故障特征与保护响应过程，优化接地网拓扑与保护配置的匹配度。在新能源接入较多的系统中，需开发适应高频接地电流的保护算法，与新型降阻材料的高频特性相协同，提升对高频故障的识别速度。

结束语：电气接地及电气保护技术在电气自动化系统中地位关键。本文系统梳理了系统特性、安全需求，以及接地和保护的关键技术与协同应用。这些技术的合理运用，能有效保障系统安全稳定。未来，随着智能化发展，需进一步推动两者协同向数字化、智能化迈进，不断优化技术，以适应电气自动化系统日益复杂的需求，为工业自动化的持续发展提供有力支撑。

参考文献

[1]刘金虎.电气自动化中电气接地及电气保护技术[J].中国机械,2020(17):57,59.

[2]栗娜.电气自动化中电气接地及电气保护技术[J].百科论坛电子杂志,2020(15):1826.

[3]夏季.电气自动化中电气接地及电气保护技术[J].建材与装饰,2020(7):257-258.