

电力系统的接地技术与展望

王重阳

中石化天津分公司 天津 300270

摘要: 电力系统的安全稳定运行离不开可靠的接地技术,其在保障设备与人身安全、维持系统正常运行中发挥着关键作用。本文围绕电力系统接地技术展开分析与展望,阐述了其基本原理,即通过接地线与接地电极实现电气连接,利用大地导电特性构建低阻抗通路,发挥故障电流疏导等作用,并按功能分为工作接地、保护接地和防雷接地。探讨了接地系统设计与计算、材料与降阻、测试与监测及特殊场景应用等关键技术。最后展望发展趋势,包括智能化与数字化转型、新型材料研发应用及多学科融合与跨领域拓展,为电力系统接地技术的发展与应用提供参考。

关键词: 电力系统; 接地技术; 展望

引言: 随着电力系统向高电压、大容量、智能化发展,对接地技术提出了更高要求。接地技术作为电力系统安全防护体系的核心环节,在故障电流疏导、电位稳定及电磁干扰抑制等方面发挥着不可替代的作用。本文旨在系统分析电力系统接地技术,从基本原理与分类入手,深入探讨关键技术,进而展望未来发展趋势,为相关研究与工程实践提供理论支持,以适应电力行业不断发展的需求。当前新能源并网、复杂地质环境及极端气候等因素使接地问题更趋复杂,亟需通过系统性研究推动技术升级,为电力系统高质量发展筑牢安全基石。

1 电力系统接地的基本原理与分类

1.1 电力系统接地的基本原理

电力系统接地是指通过接地线与接地电极将电气设备的金属部分或电力系统的中性点与大地实现可靠电气连接的技术手段。其核心原理是利用大地的导电特性,构建低阻抗电流通路,以实现电位稳定、故障防护和电磁兼容等功能。接地的关键作用体现在以下三个方面:

(1) 故障电流疏导。当发生单相接地故障时,接地装置能快速将故障电流引入大地,避免设备绝缘因过电压损坏;(2) 电位基准统一。通过接地将系统中性点或设备外壳电位固定在大地电位水平,防止不同设备间出现电位差引发触电风险;(3) 电磁干扰抑制。良好的接地可降低电力系统内部的电磁耦合,保障继电保护、自动化控制等二次设备的正常运行。

1.2 电力系统接地的主要分类

根据功能差异,电力系统接地可分为三大类:(1) 工作接地。保障电力系统正常运行而设置的接地方式,主要针对系统中性点。常见形式包括中性点直接接地(适用于110kV及以上系统,可快速切除故障)、中性点经消弧线圈接地(用于35kV-66kV系统,可补偿单相

接地电流)、中性点不接地(适用于小电流接地系统,提高供电连续性)。(2) 保护接地。旨在防止人身触电和设备损坏,将电气设备的金属外壳、构架等非带电部分与大地连接。当设备绝缘损坏时,保护接地可将外壳电位限制在安全范围,并通过接地电流触发保护装置动作。例如,变压器外壳、开关柜柜体、电动机机壳等均需强制实施保护接地,其设计需严格控制接地电阻(通常要求 $\leq 4\Omega$)。(3) 防雷接地。雷电防护体系的核心组成,通过避雷针、避雷线、避雷器等装置与接地网配合,将雷电流安全导入大地。其关键在于降低雷电流入地时的阻抗,避免设备因反击过电压受损。输电线路的防雷接地需兼顾直击雷防护与感应雷抑制,变电站则需通过优化接地网布局降低地电位升,确保设备绝缘安全^[1]。

2 电力系统的接地关键技术

2.1 接地系统的设计与计算技术

接地系统设计需以电气安全性与系统稳定性为核心目标,通过精准计算构建符合规范的接地网络。接地电阻计算是设计的基础环节,需综合考虑土壤电阻率、接地体几何参数及空间布局。对于简单接地体,可采用解析公式计算,垂直接地极电阻需计入电极长度、直径及土壤电阻率的影响,水平接地体则需考虑埋深与导体截面的修正系数。复杂接地网的电阻计算则依赖数值方法,有限元法通过将土壤区域离散为网格单元,求解拉普拉斯方程获得电位分布,进而计算接地电阻,适用于多层土壤、不规则地形等复杂场景;边界元法则通过边界积分方程简化计算,在处理无限域问题时具有更高效率。

接触电位差与跨步电位差的控制是保障人身安全的关键。计算模型需基于地电位分布特性,考虑接地网导

体的电流密度、土壤导电特性及人体阻抗参数。采用镜像法可将接地体与大地的交互作用转化为镜像电极的电场叠加,简化电位计算过程;场路耦合模型则能结合电路理论与电磁场理论,更精准地模拟故障电流分布对电位差的影响。在高土壤电阻率地区,需通过优化接地网网格密度与导体布置,降低关键区域电位梯度。

接地网的拓扑优化需平衡安全性与经济性。基于遗传算法的优化模型可将接地电阻、材料用量等作为目标函数,通过编码接地体位置与尺寸参数,在迭代过程中筛选最优方案。多目标优化则需同时满足接地电阻限值、电位差阈值及热稳定要求,通过Pareto最优解集合提供多样化设计选择。接地网的热稳定校验需依据短路电流持续时间与导体允许温度,计算最小导体截面,避免故障时导体过热熔断^[2]。

2.2 接地材料与降阻技术

接地材料的性能直接影响系统长期可靠性,其选择需兼顾导电性、耐腐蚀性与机械强度。传统金属材料中,镀锌钢凭借成本优势广泛应用,但在酸性或盐碱土壤中易发生电化学腐蚀,需通过增加镀层厚度或采用阴极保护延长寿命;纯铜导电性优异,但在高湿度环境中可能产生铜绿氧化层,影响接地性能。新型复合材料逐渐成为研究热点,铜包钢通过热轧工艺实现铜层与钢芯的冶金结合,兼具铜的导电性与钢的机械强度;石墨基复合材料以鳞片石墨为导电相,树脂为粘结剂,具有耐酸碱腐蚀与抗土壤应力的特性,适用于复杂地质环境。

降阻技术需针对土壤特性采取差异化措施。换土法通过置换接地体周围高电阻率土壤,填充降阻剂或导电砂石,形成低阻区域,适用于小面积接地网改造;深井接地利用深层土壤较低的电阻率,通过钻孔将接地极埋设于数十米深度,可有效降低接地电阻,尤其适用于表层土壤电阻率极高的地区。电解离子接地系统通过缓释电解质改善周围土壤导电性能,电极内部的化合物在水分作用下释放离子,形成导电通道,适用于干旱或岩石地质条件。

接地体的防腐处理需结合环境因素设计。对于强腐蚀土壤,采用牺牲阳极法,通过锌合金阳极与接地体形成原电池,优先消耗阳极保护接地体;涂层防腐则利用环氧树脂或聚氯乙烯涂层隔绝土壤与接地体的直接接触,涂层厚度需根据土壤腐蚀性等级确定。接地体的连接工艺需保证电气连续性与机械强度,放热焊接通过铝热反应实现导体的分子级结合,接触电阻可忽略不计,适用于铜、钢等材料的连接;压接法则通过液压工具将接头与导体紧密压合,需严格控制压接力度与模具规格。

2.3 接地系统的测试与监测技术

接地电阻测试需采用科学方法消除干扰因素。三极法通过布置电流极与电压极,测量接地体与电流极间的电压及电流,计算接地电阻,极间距离需满足大于接地体最大尺寸20倍的要求,避免边缘效应影响;四极法在三极法基础上增加辅助电压极,可消除引线电阻干扰,适用于高精度测量。钳形接地电阻仪利用电磁感应原理,通过检测环路电流与电压计算电阻,无需断开接地连接,适用于在线检测,但需确保接地环路存在闭合路径。

接地网完整性检测旨在发现导体断裂与腐蚀缺陷。直流电位降法通过在接地网注入直流电流,测量导体节点间的电位差,根据电阻变化定位故障点,分辨率可达 0.1Ω ;脉冲反射法向接地网注入脉冲信号,通过分析反射波的幅值与时间,判断导体断裂位置,检测距离可达数百米。分布式光纤监测技术将光纤传感单元嵌入接地体,通过布里渊散射效应监测温度与应变变化,间接反映导体腐蚀状态,适用于长期在线监测。

接地系统的状态监测需构建多参数感知网络。土壤电阻率监测采用四极探针传感器,通过周期性测量获得电阻率随季节与降水的变化规律;地电位监测利用埋地电极阵列,实时记录故障时的电位分布,评估接地网的均压效果。数据传输采用无线传感网络,节点间通过自组织协议通信,避免布线成本;监测中心通过数据融合算法,对多源信息进行分析,生成接地系统健康度评估报告,为运维决策提供依据。

2.4 特殊场景下的接地技术

高电压等级系统接地需应对强电流与高电位升的挑战。特高压变电站接地网采用不等间距网格设计,中心区域加密导体布置,降低电流密度;采用铜覆钢材料提高导体载流量,满足短路电流热稳定要求。接地网边缘设置环形电极,通过外延接地降低地电位升,同时采用隔离变压器抑制地电位反击对二次设备的影响。

新能源电站接地需考虑分布式电源的特性。光伏电站接地网需与支架、逆变器等设备形成等电位连接,避免阴影遮挡导致的电位差;风机接地系统采用深井与水平导体组合结构,降低塔筒与基础间的接触电压。换流站接地需考虑直流偏磁影响,通过布置极性相反的接地极,抵消直流电流对变压器的磁化作用。

极端环境接地需采取针对性措施。冻土地区采用换填法,用砂砾石替换冻土层,避免季节性冻融导致的接地体松动;沙漠地区采用深井与降阻剂结合技术,利用深层地下水提高土壤导电性。沿海地区接地网采用钛合金材料,抵抗海水侵蚀;高海拔地区则需增加接地体数

量, 补偿空气稀薄导致的绝缘强度下降^[3]。

3 电力系统接地技术的发展趋势与展望

3.1 智能化与数字化转型

智能化接地系统利用物联网技术, 通过在接地装置关键部位部署传感器, 实时采集接地电阻、地电位升、土壤电阻率等参数。这些数据借助5G等高速通信网络, 以毫秒级的速度传输至监控中心, 实现对接地系统运行状态的全天候、全方位监测。例如, 基于大数据分析技术, 可对长期积累的接地数据进行深度挖掘, 建立接地系统状态评估模型, 预测接地装置可能出现的故障, 提前发出预警信号, 极大提升电力系统运行的可靠性。在故障诊断方面, 人工智能中的机器学习算法可对监测数据进行模式识别。当接地系统出现异常时, 算法能够快速分析异常数据特征, 精准定位故障位置与类型, 如判断接地导体是否断裂、腐蚀, 土壤环境变化对接地性能的影响程度等, 为运维人员提供针对性的维修建议, 显著缩短故障处理时间, 减少停电损失。智能化接地技术还可与电力系统的其他智能组件协同工作, 通过智能电网的控制系统, 根据电力系统的运行工况, 自动调整接地参数, 优化接地性能, 适应电力系统复杂多变的运行环境。

3.2 新型接地材料的研发与应用

传统接地材料在复杂地质条件和恶劣环境下存在诸多局限, 如在高土壤电阻率地区接地电阻难以降低, 在强腐蚀土壤中易被腐蚀, 导致接地性能下降。未来纳米材料、复合材料等新型材料将为接地技术带来突破。纳米材料因其独特的微观结构, 具备优异的导电性和稳定性。如纳米碳材料制成的接地体, 其导电性相较于传统钢材大幅提升, 可有效降低接地电阻, 且具有良好的抗腐蚀性能, 能显著延长接地装置的使用寿命。复合材料则通过将不同材料的优势相结合, 满足接地技术的多样化需求。如将金属与高分子材料复合, 制造出兼具金属导电性和高分子材料耐腐蚀、耐磨损特性的接地材料。一些具备自修复功能的新型材料也在研发中, 当接地体遭受一定程度的物理损伤时, 材料可自动修复受损部位, 维持接地系统的完整性和稳定性。

3.3 多学科融合与跨领域拓展

电力系统接地技术不再局限于传统的电气领域, 正与材料科学、岩土工程、电磁学、计算机科学等多学科深度融合。在材料科学方面, 借鉴新型材料的研发成果, 为接地材料的革新提供支撑; 岩土工程知识用于优化接地装置在不同地质条件下的埋设方式与施工工艺, 提高接地系统与土壤的相互作用效果, 降低接地电阻。在电磁学领域, 深入研究接地系统在不同频率下的电磁特性, 包括雷电冲击、电力电子设备产生的高频干扰等, 以提升接地系统对复杂电磁环境的适应性, 减少电磁干扰对电力系统及周边设备的影响。计算机科学则为接地技术的仿真模拟、数据分析和智能控制提供强大工具。利用计算机模拟技术, 可在接地系统设计阶段对不同方案进行虚拟测试, 优化接地网布局、导体尺寸等参数, 提高设计效率与准确性。接地技术在跨领域应用上也不断拓展。随着新能源产业的蓬勃发展, 风电、光伏电站等新能源设施对接地技术提出了新需求^[4]。通过多学科融合与跨领域拓展, 电力系统接地技术将不断创新, 为各行业的发展提供更可靠的支撑。

结束语: 电力系统接地技术是保障电力系统安全运行的重要基石。从基本原理到关键技术, 再到未来趋势, 其发展不断适应电力系统的变革。随着智能化、新材料及多学科融合等趋势的推进, 接地技术将更趋完善。在实际应用中, 需结合具体场景合理运用各项技术, 持续创新优化, 以应对日益复杂的电力系统环境, 为电力行业的可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]范贤达,黄琛.电力系统的接地技术分析与展望[J].集成电路应用,2021,38(6):78-79.
- [2]刘伟.电力系统的接地技术分析与展望[J].城市周刊,2021(45):58-59.
- [3]毛悦.电气自动化中电气接地及电气保护技术分析[J].科技资讯,2025,23(1):55-57.
- [4]汤亮亮.新型电力系统接地关键技术及展望[J].电瓷避雷器,2023(1):10-11.