

输电网中间接地系统过电压分析与绝缘协调研究

岳彩勇¹ 张 瑞² 李庆才²

1. 山东省电力公司冠县供电公司 山东聊城 252500

2. 山东省电力公司莘县供电公司 山东聊城 252400

摘要: 在电力系统中性点接地方式对系统运行安全性和经济性具有重要影响。中性点经消弧线圈接地的间接接地系统因具备限制接地故障电流、提高供电可靠性等优势,广泛应用于中高压输电网中。然而,在不同运行和故障工况下,该系统易出现多种类型的过电压现象,如铁磁谐振、操作过电压、暂态恢复电压和单相接地引起的过电压等,若未有效控制,极易造成设备绝缘击穿与系统稳定性破坏。本文基于输电网实际运行特性,系统分析间接接地方式下的过电压成因、传导路径与影响规律,进一步提出面向不同过电压类型的绝缘协调策略,构建包括线路、变电设备及避雷器在内的整体协调方案。研究结果可为间接接地系统的安全设计、设备选型及运行维护提供理论依据与工程指导。

关键词: 间接接地; 过电压; 铁磁谐振; 绝缘协调; 消弧线圈; 暂态过程

引言

随着输电电压等级和系统复杂度的不断提升,电力系统对过电压抑制与绝缘设计的要求愈加严格。中性点不直接接地的系统虽然具备容错能力高、电弧自熄性强等优点,但也因其特殊的电气特性,在遭遇暂态扰动时更易产生高幅值、长持续时间的过电压。特别是在我国35 kV~220 kV等级的区域输电网中,消弧线圈接地系统广泛应用,其运行安全面临铁磁谐振、单相接地续流及操作过电压等多重挑战。因此,开展间接接地系统的过电压类型辨识与防控策略研究,对于提升输电系统绝缘配置的经济性与可靠性、降低故障率、延长设备寿命具有重要的理论与实践意义。

一、间接接地系统及其过电压类型分析

(一) 间接接地系统结构与电气特性

间接接地系统是指通过消弧线圈、电阻或高阻抗电抗等装置将系统中性点与大地连接的一类小电流接地方式,其在我国35 kV~220 kV等级的输电系统中被广泛采用。相较于中性点直接接地系统,间接接地系统在单相接地故障时能够有效限制故障电流,提高系统的持续供电能力,避免短时接地引起的跳闸停电。在正常运行状态下,系统中性点电位稳定,各相电压对地基本对称。但当发生单相接地时,故障相电压降为零,而其余两相对地电压则提升至线电压的 $\sqrt{3}$ 倍,即约1.73倍额定电压,形成较大幅值的不对称暂态。此时,系统通过消弧

线圈电感电流与系统对地电容电流的匹配,实现在一定时间内的电弧自熄与运行维持。然而,若消弧线圈参数调节失配或电容电流过大,极易导致续流不熄与电弧重燃,引发电压波动与谐振过电压等继发现象。从系统结构上看,间接接地系统中的消弧线圈、电压互感器(PT)、线路电容、电抗器等元件构成了复杂的容感网络,具备形成铁磁谐振、暂态振荡及低频次过电压的物理条件。在系统扰动、设备投切或操作切换过程中,若触发上述耦合机制,将可能出现高幅值、持续时间不确定的暂态电压尖峰,进而威胁PT、GIS、电缆护套、避雷器等电气设备的绝缘安全。因此,深入掌握该系统的电气响应特性及其内部能量分布规律,是开展后续过电压建模与绝缘协调设计的基础。

(二) 间接接地系统中的主要过电压类型

由于间接接地系统中性点未实现刚性对地参考,其在运行过程中更容易受到扰动诱发的各类过电压影响,尤其在单相接地、合闸操作、设备空载、雷电干扰等典型工况下更为突出。具体而言,常见的过电压类型主要包括以下几类:其一,铁磁谐振过电压。该类过电压主要源于PT铁芯非线性特性与系统电容耦合产生的低频非正弦振荡,常伴有电压幅值突升与波形畸变,易造成PT爆炸或误动作。其二,操作过电压。在线路合闸、变压器投切、电容器组切换等操作过程中,系统电感与电容间产生高频振荡,其波前陡峭、幅值高、持续时间短,对设备绝缘造成冲击负担。其三,单相接地故障引起的

暂态过电压。在该类故障中，非故障相电压升高，持续作用于非故障相设备，易引发绝缘老化甚至击穿。此外，雷击感应过电压与开关操作瞬态亦会通过线路耦合或电磁反射形成幅值高、作用点不定的暂态干扰，对避雷器残压能力及母线绝缘形成挑战。

二、输电网中间接地系统的过电压建模与仿真分析

(一) 建模方法与仿真平台选型

为深入剖析间接接地系统中各类典型过电压的成因、传播路径及其对绝缘系统的冲击机理，本文基于PSCAD/EMTDC平台建立了220 kV典型输电网仿真模型。该平台具备处理电力系统暂态电磁过程的高精度计算能力，适用于谐振分析、合闸操作、故障暂态及雷击响应等多种工况建模需求。模型主要包括以下组成部分：发电端源系统、主变压器、出线段线路模型、PT、电抗器、消弧线圈、母线及典型负荷单元等。消弧线圈接地方式采用变感抗结构，PT采用非线性磁化特性建模，电缆及架空线路部分则基于 π 型网络等效建模，确保模拟准确反映频率响应特征。在建模过程中，仿真输入参数选取结合国家电网典型工程数据，主要参考220 kV系统中主变压器的漏感、母线电容、电缆线长、电缆分布参数与消弧线圈阻抗配置。同时，系统预设了多种暂态扰动激励源，包括：单相接地故障（接地电阻变化范围为0~100 Ω ）、空载线路合闸操作、PT与母线谐振激发源、雷击冲击波注入等场景，力求全面反映系统在实际运行中的电磁暂态响应。

(二) 典型工况仿真与响应特性分析

通过设定多组典型暂态工况，仿真结果揭示了间接接地系统在不同激励条件下的过电压响应特征。实践中在铁磁谐振分析时可以发现，仿真模型通过逐步调节系统等效对地电容，模拟空载线路状态下PT绕组与系统电容间形成3次谐振条件。当达到共振频率附近时，PT一次侧电压出现非正弦振荡波形，其峰值升至额定电压的2.6倍，谐振频率约为16 Hz，电压波形畸变严重。此种低频大振幅谐振若未有效限制，将可能导致PT铁心过饱和，引发热击穿。其次，在操作过电压场景下，模拟一条长距离空载线路进行远端合闸操作。仿真数据显示合闸瞬间电压呈现尖峰式前沿，电压幅值在合闸点跃升至2.3倍额定电压，波形中包含明显高频振荡成分（频率集中在34 ms，振荡能量可累积至相邻电气节点，对母线绝缘和避雷器性能构成冲击。若配套避雷器残压裕度不足，将易引发局部放电与热积聚失效。在单相接地仿真

中，通过设置线路末端A相接地故障点，且调节消弧线圈脱调状态，结果显示故障相电压瞬间跌落至零，B、C相对地电压升高至1.73倍以上，峰值超过额定电压的2.1倍，波形中同时伴随小幅次谐波成分扰动，持续时间约20 ms。若故障未被及时切除或弧光自熄失败，系统电压将进入不稳定波动状态，诱发继电保护误动作或绝缘击穿。此外，在线路末端注入雷击感应波时，仿真波形显示母线处出现高达4倍额定电压的尖峰冲击，波前上升时间小于1 μ s，严重超出绝大多数设备工频绝缘水平。

三、绝缘配合原则与多级保护配置策略

(一) 输电系统的绝缘配合原则

在间接接地系统中，由于过电压类型多样且特性复杂，如何在保证安全性的同时实现经济合理的绝缘配置，成为电网运行与设备选型的核心问题。绝缘配合是指在既定过电压水平下，通过合理设计绝缘系统的耐受等级，使其在遭遇最不利暂态条件时仍能保持介质完整性与功能安全。依据IEC 60071系列国际标准及我国GB 311.1等相关规范，输电系统中的绝缘配合应满足以下三类耐受能力要求：运行电压下的工频耐压、操作过电压下的冲击耐压、雷击过电压下的耐冲击性能。在间接接地系统中，绝缘配合的设计原则应基于“限值保护+裕度控制”的双重策略。首先，根据系统最大工作电压（ U_{max} ）确定工频耐压等级，保证设备长期稳定运行不受慢变电压影响；其次，对典型暂态过电压类型如合闸尖峰、谐振过电压、接地升压等进行幅值计算与统计分析，提取最大暂态电压 U_{tmax} 作为冲击耐受的设计基准。为提高系统容错能力，通常需在 U_{tmax} 基础上设置10%~25%的绝缘裕度系数。具体而言，在中压系统（35~110 kV）中建议采用1.8倍以上额定电压的绝缘等级，而在220 kV及以上高压等级系统中，推荐选用2.0倍额定电压的设备绝缘水平，尤其对于母线、PT、GIS、套管、电缆终端等薄弱环节，更应预留足够的绝缘余量。此外，间接接地系统在发生单相接地时，非故障相电压升高的持续性相对较强，因此在绝缘选择过程中应特别关注“长持续暂态”条件下的耐压曲线匹配，避免因长期电压升高引发热击穿或介质疲劳。

(二) 多级防护配置策略

绝缘协调不仅涉及设备本体的耐压能力配置，更依赖于整体防护体系的科学布设与功能联动。在间接接地系统中，由于电压扰动源可呈现出多个耦合路径和频谱层次，因此应采取“分区防护+分频响应+多级协调”的

保护策略，以构建结构合理、响应快速、覆盖全面的防护体系。

第一，在一次设备层面，应优选高抗冲击性能的元素材料与结构设计。主变压器可采用匝间绝缘增强型绕组结构，GIS设备内部导体间隙应按最高暂态电压预期进行重新核算；电缆终端应加强防电晕处理，采用应力锥改良型设计以减小场强集中。此外，PT应配置防谐振保护器件，如非线性阻尼片、RC滤波器，以应对可能触发的3次或5次铁磁谐振。

第二，在系统过电压限制方面，应结合实际电压水平与运行特点，分布式布设金属氧化物避雷器（MOA）。MOA的残压应低于被保护设备的冲击耐受下限20%以上，以确保其优先导通；安装位置宜布设于线路引入段、变电站母线端、消弧线圈接入点与电缆分界点等过电压耦合敏感节点。针对合闸操作产生的中频振荡波段，可配合投切吸收器、并联阻尼器等低能量耗散装置以缓冲初期冲击波。

第三，为提升系统动态调谐能力，建议在消弧线圈接入环节引入可控调感装置，配合系统电压波动、负荷转移自动调节线圈电抗值，实现故障期间的快速谐振点偏移，提升电弧自熄效率，抑制过电压持续激励。此外，在变电站监控系统中嵌入电压暂态监测模块与故障波形识别算法，可实现铁磁谐振、合闸振荡等过电压模式的智能识别与报警联动，有效支撑运维人员进行预防性维护。第四，为进一步提高系统的弹性设计能力，应构建过电压防护冗余体系。例如，在高敏感区域或负荷密集中心站点，除常规避雷器配置外可辅以浪涌吸收阵列或后备开关型限压器，增强系统在极端天气或设备老化条件下的防护容错空间。

四、典型案例分析

华东某地区一座220 kV区域变电站在2023年春检期间发生了一起典型的铁磁谐振事故。该站采用单母线分段接线，系统中性点通过消弧线圈接地。在合环操作过程中，由于空载线路的并入使系统对地电容突增，而现场未同步调整消弧线圈参数，导致系统进入弱调谐状态。操作瞬间，中性点电位上升显著，PT一次侧与系统电容形成了低频次谐振通道。由于PT铁心存在非线性饱和特性，在激发频率接近其谐振点时，输出波形严重畸变，局部电压幅值超过额定值的2.7倍。该过程未被监测系统及时识别，加之二次侧未配置RC抑制装置，最终导致PT绝缘穿刺、爆炸损毁，引发母线电压扰动与相邻断路器误动作，造成多回线路跳闸与区域电压跌落，事故

影响范围广泛。事后技术评估显示，该站在设计阶段未充分考虑谐振条件下的PT选型与抑制措施，运行人员对空载合环操作带来的系统电容突变也缺乏足够预判。此外，该变电站的消弧线圈为手动调节型，缺乏实时闭环调谐机制，难以及时响应系统运行状态的动态变化。该事故的发生充分暴露出在实际工程中，部分间接接地系统缺乏过电压识别机制、调谐灵活性不足及运维人员对非工频风险意识淡薄等问题。通过对事故数据的深入分析，发现该变电站的接地系统设计存在明显短板，尤其是在电容电流估算和消弧线圈配置方面未能充分考虑实际运行工况的复杂性。而设备选型与系统参数匹配度不足，进一步加剧了过电压事件的发生概率。针对此类问题，建议在今后的设计中引入动态谐振评估机制，并结合实时监测技术优化消弧线圈的调谐性能。同时应强化对运维人员的专项培训，提升其对非工频过电压现象的认知水平和应急处置能力，以降低类似事故的风险。

结束语

本文系统分析了输电网中间接地系统所面临的主要过电压类型，基于建模与仿真验证了铁磁谐振、操作过电压与接地暂态对系统绝缘的冲击特征，提出了符合IEC标准的绝缘配合原则与防护配置策略，并通过典型工程案例验证了研究成果的实用性与工程指导意义。研究认为，合理的接地方式设计与多层次保护机制对于提升系统过电压耐受能力具有关键作用。

参考文献

- [1] 秦玉文, 段超, 杨祺铭, 等. 输电网强度大幅变化下的主动配电网静态电压稳定约束研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13[2025-06-30]
- [2] 李子秀, 陈宁, 李建华, 等. 输电网故障时新能源并网点电压跌落及影响范围计算方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(03): 1122-1130
- [3] 刘铠诚, 何光宇, 黄良毅, 等. 考虑可再生能源不确定性的输电网多目标混成自动电压控制[J]. 电网技术, 2016, 40(02): 369-375.
- [4] 卢冰. 基于静态电压稳定性的含风电场的输电网规划方法研究[D]. 浙江大学, 2010.
- [5] 王兴刚. 输电网严重故障后的电压稳定裕度实时评估与最优恢复策略快速计算[C]// 云南电网公司, 云南省电机工程学会. 2009年云南电力技术论坛论文集(文摘部分). 云南电网公司电力研究院, 2009: 76.