

# 中压配电网接地方式优化与单相接地故障处理技术综述

徐金奎

南水北调中线信息科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4938

**[摘要]** 中压配电网作为连接输电网与用户负荷的关键环节,其运行可靠性直接关系到供电质量与社会经济活动。单相接地故障是中压配电网中最常见的故障类型,占比高达80%以上。不同接地方式对系统在单相接地故障下的电弧熄灭能力、过电压水平、继电保护配合及人身设备安全具有决定性影响。本文系统梳理了中压配电网主要接地方式(包括不接地、经消弧线圈接地、经小电阻接地及高阻接地)的技术原理、适用场景及优缺点;深入分析了各类接地方式下单相接地故障的电气特征与演变机理;重点综述了近年来在接地方式优化配置、故障选线与定位、智能消弧、柔性接地等领域的关键技术进展;最后,结合新型电力系统发展趋势,探讨了未来中压配电网接地技术的发展方向与挑战,为工程实践与科研提供参考。

**[关键词]** 中压配电网; 接地方式; 单相接地故障; 消弧线圈; 小电阻接地; 故障选线; 智能配电  
**中图分类号:** TM727 **文献标识码:** A

## A Review of Grounding Mode Optimization and Single-Phase Ground Fault Handling Technology in Medium-Voltage Distribution Networks

Jinlei Xu

South-to-North Water Diversion Middle Route Information Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** As the key link connecting transmission networks and user loads, the operational reliability of medium-voltage distribution networks directly affects power supply quality and social and economic activities. Single-phase ground faults are the most common fault type in medium-voltage distribution networks, accounting for more than 80% of all faults. Different grounding modes have decisive effects on arc extinguishing capability, overvoltage levels, relay protection coordination, and personal and equipment safety under single-phase ground faults. This paper systematically reviews the technical principles, applicable scenarios, and advantages and disadvantages of major grounding modes in medium-voltage distribution networks, including ungrounded, arc suppression coil grounding, low-resistance grounding, and high-resistance grounding. It deeply analyzes the electrical characteristics and evolution mechanisms of single-phase ground faults under various grounding modes. Key technical advances in recent years in grounding mode optimization configuration, fault line selection and location, intelligent arc suppression, and flexible grounding are comprehensively reviewed. Finally, combined with the development trends of new power systems, future directions and challenges of grounding technology in medium-voltage distribution networks are discussed, providing references for engineering practice and research.

**[Key words]** medium-voltage distribution network; grounding mode; single-phase ground fault; arc suppression coil; low-resistance grounding; fault line selection; smart distribution

### 引言

随着我国城市化进程加速和能源结构转型,中压配电网(通常指10 kV或20 kV电压等级)规模持续扩大,结构日益复杂,分布式电源、电动汽车充电桩、储能系统等多元负荷大量接入,使得配电网运行特性发生深刻变化。在此背景下,保障配电网安全、

可靠、高效运行成为电力系统研究的核心议题之一。单相接地故障(Single-Line-to-Ground Fault, SLG)是影响供电可靠性的首要因素。尽管单相接地故障在非有效接地系统中通常不会立即导致跳闸,但若处理不当,可能引发间歇性电弧、谐振过电压、相间短路甚至人身触电事故,严重威胁系统安全。因此,合

理选择与优化接地方式,并配套高效的单相接地故障处理技术,成为提升配电网韧性与智能化水平的关键。

## 1 中压配电网主要接地方式及其特性分析

### 1.1 不接地系统

不接地系统是变压器中性点不引出或经高阻抗( $>1000\Omega$ )接地。发生单相接地故障时,故障点电流由系统对地分布电容形成,数值小(一般 $<10A$ ),多数瞬时性故障可自熄。早期,其结构简单、初期投资低,在以架空线路为主的农村或偏远地区配电网广泛应用。且故障后系统能带故障运行1-2小时,供电连续性好,对邻近通信线路电磁干扰小。但随着电缆线路增多,系统对地电容增大,电容电流可能超10A,电弧难自熄,产生间歇性燃弧,易激发3-4倍相电压的弧光接地过电压,威胁设备绝缘安全。同时,故障电流微弱,传统继电保护装置难检测和定位故障,运维困难。因此,在现代高电缆化率城市配电网中局限性凸显。

### 1.2 经消弧线圈接地系统

该方式在变压器中性点接入可调电抗器(消弧线圈),使感性电流与系统容性电流抵消,降低接地点残余电流。理想调谐时,残流趋近于零,可抑制电弧重燃,将过电压控制在2.5倍相电压以内。系统发生单相接地故障后能维持数小时运行,提升供电可靠性,适用于以电缆为主、对连续供电要求高的城市配电网,我国自20世纪80年代起在大城市推广,经验丰富<sup>[1]</sup>。不过,它也面临挑战。系统对地电容动态波动,要求消弧线圈实时跟踪调谐,控制逻辑复杂;补偿后残流通常在5-10安培,难以实现高精度故障选线;电感与电容参数匹配不当,可能激发谐振,甚至因电压互感器饱和引发铁磁谐振,损坏设备。此外,初期投资和后期维护成本高,限制了在经济欠发达地区的应用。

### 1.3 经小电阻接地系统

经小电阻接地是有效接地方式,在中性点接入低值电阻(10-30欧姆),将单相接地故障电流限制在数百安培(如600A或1000A),使继电保护装置能快速、可靠动作切除故障。其优势明显,故障电流大、特征明显,便于利用零序电流保护实现高灵敏度故障识别与隔离;故障迅速清除,过电压抑制在2.0倍相电压以下,降低设备绝缘要求;大电流接地可防止多重接地故障演变成相间短路。因此,在北京、上海、广州等负荷密集、自动化水平高的城市核心区广泛应用。然而,该方式弊端突出。故障即跳闸,牺牲供电连续性,不符合现代供电理念;数百安培接地电流在故障点周围形成较高跨步电压和接触电压,若接地网设计或防护措施不到位,易引发触电事故;大电流对邻近通信线路产生强电磁干扰,需额外屏蔽或隔离。推广应用需配套完善安全防护体系和严格运维管理标准。

### 1.4 高阻接地系统

高阻接地系统介于不接地与小电阻接地之间,中性点通过数百至数千欧姆电阻接地,将单相接地故障电流限制在5-10安培。它试图兼顾供电连续性与选线性能,理论上可抑制弧光过电压,允许系统短时带故障运行,适用于对连续性与安全性有折中需求的特定工业用户或敏感负荷区域。但该方式存在诸多问题。

电阻长期通流有热损耗,产生发热与能耗;故障电流仍较低,选线精度难保证。且国内外工程应用案例少,相关设计标准、保护配置及运维规程不完善,限制了大规模推广,更多作为过渡性或特殊场景技术选项,未成主流。

## 2 单相接地故障的电气特征与演变机理

### 2.1 故障电流特性

在不同接地方式下,单相接地故障电流呈现出显著差异。在不接地或经消弧线圈接地系统中,故障电流主要由系统对地电容决定,或经补偿后的残余电流构成,幅值通常小于30安培,波形接近正弦,高频分量较少,这使得基于稳态量的保护方法难以有效识别故障线路。相比之下,经小电阻接地系统中的故障电流可达数百安培,包含明显的工频分量,且由于电弧的非线性特性,可能叠加一定谐波成分,为保护装置提供了清晰的故障判据<sup>[2]</sup>。高阻接地系统的故障电流则介于两者之间,虽有一定幅值,但信号仍较微弱。值得注意的是,随着分布式电源的接入,故障电流可能出现双向流动甚至反向注入,进一步增加了故障特征的复杂性。

### 2.2 暂态过程与过电压

单相接地故障往往伴随强烈的电磁暂态过程。当故障点形成电弧后,在电压过零时刻电弧可能暂时熄灭,但随着恢复电压的上升,若介质强度恢复不足,电弧将重新点燃,形成多次重燃现象。每一次重燃都会激发出频率在数千赫兹的高频振荡电流,进而引发幅值极高的弧光接地过电压。在消弧线圈接地系统中,若电感与系统电容参数接近谐振点,则可能激发持续的工频或分频谐振过电压,对设备绝缘构成长期威胁。此外,电压互感器在铁芯饱和状态下可能与系统电容形成非线性回路,诱发铁磁谐振,导致PT烧毁甚至系统崩溃。这些暂态过电压不仅威胁一次设备安全,还可能干扰二次保护与控制系统,造成误动或拒动。

### 2.3 故障演化路径

单相接地故障的演化具有典型路径。研究表明,约70%的单相接地为瞬时性故障,如树枝短暂搭接、鸟害或雷击闪络等,若能及时熄灭电弧,系统可自动恢复正常运行。然而,若电弧持续燃烧,将导致绝缘材料碳化、劣化,使瞬时故障转变为永久性接地。在此基础上,若未及时隔离,故障点可能因电弧高温或机械振动引发相邻相导体短接,最终发展为破坏性极强的相间短路故障。这一演化过程凸显了快速、精准处理单相接地故障的重要性——不仅要识别故障,更要干预其发展路径,防止“小故障酿成重大事故”。

## 3 接地方式优化与故障处理关键技术

### 3.1 接地方式优化配置策略

针对大型配电网结构复杂、负荷多样等特点,单一接地方式已难以满足全网需求。为此,工程实践中开始探索分区混合接地模式,例如在主干网采用小电阻接地以确保快速隔离和系统稳定性,而在分支或末端线路采用消弧线圈接地以维持局部供电连续性。更进一步,动态可调接地技术应运而生,其核心是通过智能接地柜或电力电子装置,根据实时监测的电容电流和故障

状态,自动切换中性点接地阻抗,实现“正常运行时高阻抗、故障发生时低阻抗”的灵活控制策略<sup>[3]</sup>。此外,学术界也在构建多目标优化模型,综合考虑供电可靠性、人身安全、设备投资、运维成本及环保指标,为接地方式的选择提供科学决策支持。

### 3.2 单相接地故障选线与定位技术

故障选线是处理流程的第一步,其准确性直接决定后续处置效果。传统稳态量法依赖零序电流的幅值或相位比较,在小电阻系统中效果良好,但在消弧线圈系统中因残流微弱而性能受限。为此,研究者转向利用故障初始阶段的暂态信息,如高频行波或暂态零序电流,通过小波变换、希尔伯特-黄变换(HHT)等信号处理手段提取特征,显著提升了选线灵敏度与抗干扰能力。注入信号法则是另一类有效途径,通过向中性点注入特定频率(如205 Hz)的电流信号,利用接收端检测信号强度实现选线,其优点是不受系统运行方式影响。近年来,人工智能技术的引入为该领域注入新活力,基于卷积神经网络(CNN)或长短期记忆网络(LSTM)的深度学习模型,能够从海量历史故障数据中自动学习复杂非线性特征,实现高精度故障识别。在故障定位方面,行波测距法凭借其高精度优势被广泛研究,而依托配电网部署的分布式智能终端(如FTU/DTU)则可通过协同分析实现故障区段的快速锁定。

### 3.3 智能消弧与主动干预技术

为提升消弧效率,自动调谐消弧线圈技术已趋于成熟,其通过在线测量系统电容电流并驱动电机或磁阀调节电感值,可在数秒内完成调谐,将残流控制在5安培以下。更前沿的相控开关消弧技术则通过精确控制断路器在电压过零点开断,强制熄灭电弧,适用于特定场景。最具革命性的是柔性接地技术,它采用基于IGBT等全控型器件的电力电子变流器连接于中性点,能够动态生成与故障电流反向的补偿电流,理论上可将残流降至零,彻底消除电弧与过电压<sup>[4]</sup>。同时,该装置还可主动注入特征信号用于故障识别,甚至支持系统在永久性接地状态下长期运行,代表了未来接地技术的发展方向。

### 3.4 数字化与智能化支撑

现代信息技术为接地故障处理提供了强大支撑。配电网物联网(DIoT)通过部署高精度零序电流互感器、暂态录波装置和边缘计算终端,实现了对故障全过程的全景感知。数字孪生技术则构建了配电网接地系统的虚拟映射,可在数字空间中仿真各类故障场景,优化保护定值与控制策略。在架构层面,云边协同模式日益普及:边缘侧负责毫秒级快速选线与本地控制,云端则进行大数据分析、故障预测与知识沉淀,形成“感知—决策—执行—优化”的闭环智能体系。

## 4 未来发展趋势与挑战

### 4.1 发展趋势

未来中压配电网接地技术将朝着智能化、主动化、一体化方向深度演进。接地方式将从被动适应系统参数转向主动调控故障过程,柔性接地、数字接地等新技术有望逐步从示范走向规模化应用。故障处理将不再局限于“检测—跳闸”模式,而是融合选线、定位、隔离、自愈功能,形成完整的智能处置闭环。同时,接地策略必须与高比例分布式电源、电动汽车、储能等新型元素深度融合,具备更强的适应性与鲁棒性。此外,推动智能接地装置的标准化与模块化设计,统一通信接口与测试规范,将有助于降低部署门槛,加速技术推广。

### 4.2 面临挑战

尽管前景广阔,但中压配电网接地技术仍面临多重挑战。首要难题是如何在保障人身安全与维持供电连续性之间取得平衡——小电阻接地虽可靠但牺牲连续性,而高连续性方案又可能带来安全风险。其次,高阻抗故障(如树障、动物触碰等,故障阻抗常大于1千欧)因信号极其微弱,现有检测技术检出率普遍偏低。再次,大接地电流对邻近通信线路的电磁兼容问题仍需深入研究与有效抑制。最后,柔性接地等高端技术成本高昂,缺乏成熟的商业模式与政策激励机制,制约了其在广大地区的普及应用。

## 5 结语

中压配电网接地方式的选择与优化是提升系统可靠性与安全性的核心环节。传统不接地、消弧线圈、小电阻接地各有适用边界,需根据网架结构、负荷特性、安全标准等因素综合决策。面对新型电力系统的发展需求,单相接地故障处理技术正朝着智能化、主动化、一体化方向演进。柔性接地、暂态选线、数字孪生等新兴技术展现出巨大潜力。未来,应加强多学科交叉融合,推动标准体系建设,平衡安全、可靠、经济、环保等多重目标,构建更具韧性的新一代中压配电网。

### [参考文献]

- [1]屈建宇,张竞帆,赵钊卿.中压配电网低电阻接地系统接线方式研究[J].低碳世界,2021,11(01):84-85.
- [2]薛融.中压配电网环网运行方式下单相接地故障定位方法[D].华北电力大学(北京),2020.
- [3]姚远.中压配电网复杂接地故障诊断技术[D].华北电力大学(北京),2023.
- [4]曾祥君,王福恒,李理,等.中压配电网接地故障快速安全处置技术[J].供用电,2021,38(12):2-8+14.