

Research on Single-Phase Ground Fault Characteristics and Transient Processes in Neutral-Point-Not-Earthen Power Systems

Yan Li

Inner Mongolia Huaheng Energy Technology Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016061, China

Abstract

The grounding method of the neutral point directly impacts the operational stability and fault characteristics of power systems. Neutral-Point-Not-Earthen (NPE) systems, widely adopted in medium and low-voltage distribution networks due to their simple structure and cost-effectiveness, often exhibit zero-sequence voltage surges, complex transient currents, and sustained overvoltages during single-phase ground faults, posing insulation safety risks. Through theoretical analysis and transient simulation, this study investigates the voltage-current variation patterns and transient response characteristics of single-phase ground faults. Results demonstrate that capacitive currents, residual voltages, and transient arcs during fault initiation are critical factors triggering overvoltages and resonances. By modeling zero-sequence networks and analyzing energy transfer, the dynamic response patterns under varying grounding capacitance, line length, and fault resistance are revealed, providing theoretical foundations for optimizing grounding methods, fault detection, and overvoltage protection.

Keywords

Neutral point ungrounded; Single-phase ground fault; Transient process

电力系统中性点不接地系统单相接地故障特性与暂态过程研究

李岩

内蒙古华恒能源科技有限公司, 中国·内蒙古 乌海 016061

摘要

中性点接地方式直接影响电力系统的运行稳定性与故障特性。中性点不接地系统因结构简单、经济性高而广泛应用于中低压配电网,但在单相接地故障下易出现零序电压升高、暂态电流复杂及过电压持续等问题,对绝缘安全构成威胁。本文基于理论分析与暂态仿真,研究单相接地故障的电压、电流变化规律与暂态响应特征。结果表明,故障初期的电容电流、残余电压及暂态电弧是引发过电压与谐振的关键因素。通过零序网络建模与能量传递分析,揭示了不同接地电容、线路长度及故障电阻下系统的动态响应规律,为接地方式优化、故障检测与过电压防护提供理论依据。

关键词

中性点不接地; 单相接地故障; 暂态过程

1 引言

在现代电力系统中,中性点接地方式的选择对系统运行的安全性与稳定性具有重要影响。中性点不接地系统因能在单相接地时维持供电连续性,被广泛应用于 6~35 kV 配电网中。该系统结构简单,能有效减少中性线电流并降低设备造价,但其在发生单相接地故障时会出现电压不平衡、暂态过电压及电弧再燃等问题。若处理不当,不仅可能损伤绝缘设备,还会引发电气火灾及谐振过电压事故。

近年来,随着电网规模扩大与自动化水平提升,对中性点不接地系统的故障特性研究逐渐深入。传统稳态理论虽能描述接地电压分布规律,但对暂态过程中电弧特性、容性电流变化及能量转移机理的解释仍显不足。本文基于暂态分析理论,结合电磁暂态仿真与零序网络建模,系统研究中性点不接地系统的单相接地故障特征与暂态响应规律,旨在为电力系统接地方式优化及过电压防护策略提供理论支持。

2 中性点不接地系统的结构特征与故障机理

2.1 系统构成与电压分布特征

中性点不接地系统通常由三相对称电源、输电线路及负载构成,其中电源中性点处于悬浮状态,与地之间没有直

【作者简介】李岩(1985—),男,中国宁夏人,本科,从事电力工程研究。

接电气连接^[1]。系统在正常运行时，三相电压保持对称，三相对地电压相等，电压矢量呈120°相位差分布，系统处于平衡状态。由于不接地方式下中性点电位不固定，电源、线路及负载对地间形成等效分布电容通路。当任一相发生接地时，该相对地电压迅速降为零，而其余两相对地电压相应升高至相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，使绝缘电场强度显著增强，增加了线路与设备的绝缘应力。中性点悬浮导致系统电压易受外界干扰而发生偏移，使得不接地系统在暂态过程中表现出明显的电压不对称性与电容充放电特征，对电气设备的绝缘设计和运行安全提出了更高的技术要求。

2.2 单相接地故障的等效模型与参数影响

当中性点不接地系统发生单相接地故障时，可将其等效为一相接地、两相通过电容与地相连的零序网络模型。此时，故障相电压降为零，非故障相对地电压升高，系统对地电容电流成为主要故障电流来源。接地电流的大小受线路长度、分支数量、布线方式及系统电容分布影响显著。当系统总对地电容较大时，电容电流亦随之增大，导致接地点处电弧难以在电压过零时熄灭，形成间歇性重燃现象。该现象不仅引起系统电压的暂态震荡，还可能触发谐振，导致过电压叠加效应。理论建模与仿真研究表明，接地阻抗、相间电容耦合程度及系统运行频率均会对故障电流波形和暂态能量分布产生影响，从而改变系统的稳定性与安全裕度。

2.3 不接地系统运行的安全隐患

尽管中性点不接地系统在单相接地时能够维持短期带故障运行，避免供电中断，但其潜在风险不可忽视。故障持续存在将导致系统绝缘长期受高电压应力作用，加速绝缘老化，降低设备寿命。间歇性电弧放电会在非故障相上产生高频暂态过电压，易引发相间击穿甚至设备烧毁^[2]。此外，若故障未被及时检测和清除，可能导致多点接地，改变系统零序网络特性，引发过电压共振与继电保护误动。长时间运行还会导致系统稳态电位漂移，增加电气火灾隐患。研究表明，对不接地系统的暂态过程及电弧特性进行深入分析，是制定早期接地检测、暂态监测与绝缘防护策略的关键基础，对提高电力系统运行的安全性与可靠性具有重要工程意义。

3 单相接地故障的暂态特征分析

3.1 故障初期的电容放电与电压畸变

当单相接地故障发生的瞬间，接地点的相电压迅速降为零，对地电容立即释放储存的电能量，形成快速的电容放电现象。该放电使系统相间电压与零序电压瞬时失衡，引发全网电压的畸变。由于非故障相与故障相间存在电位耦合，未接地两相电压将上升至相电压的 $\sqrt{3}$ 倍左右，中性点电位发生偏移，造成系统整体电压分布的不对称。此时，零序电压在极短时间内快速上升，波形呈现明显的尖峰特征。仿真分析表明，在10 kV中性点不接地系统中，零序电压峰值可达额定相电压的1.5至1.8倍。该暂态畸变过程为电弧放电提

供了初始能量条件，也是后续过电压形成与谐振累积的重要物理基础。

3.2 暂态电弧的形成与维持机制

电弧放电是单相接地暂态过程中最复杂且最具非线性环节的环节。故障发生后，若电容电流较大，电弧在电压过零时无法完全熄灭，形成电弧再燃现象。此时，电弧阻抗呈强非线性变化，其导通与熄灭过程会引发周期性的高频电压波动。测量与仿真结果显示，当系统电容电流超过10 A时，电弧持续时间可超过20 ms，非故障相电压出现周期性震荡，系统中频带谐波幅值显著放大。电弧的再燃不仅导致暂态过程随机性增强，还可能诱发电容电感并联谐振，从而叠加形成附加过电压。电弧放电的维持取决于局部气隙电场强度、介质温度及系统电容能量的释放速率，其动态特性决定了系统暂态响应的复杂性与不稳定性。

3.3 暂态过程的能量耦合与电磁响应

在单相接地暂态过程中，系统中的电磁能在电容、电感与电阻之间反复转换与耦合，形成典型的多能量通道相互作用过程。故障发生后，线路分布电容释放能量，经系统电感储能后再反馈至电源端，形成周期性的能量振荡，使零序电压幅值出现多次峰值变化。若线路电感与电容参数满足特定谐振条件，系统将出现电容—电感谐振现象，导致非故障相电压明显升高。该能量耦合效应不仅影响暂态过程的衰减速率，也决定了系统在不同频率下的电磁响应特性^[3]。实验证明，能量振荡幅度随电容电流与线路长度增加而增强，暂态过电压峰值升高约30%~50%。此类耦合效应是系统中工频过电压及高频电磁干扰的主要来源，对绝缘配合、继电保护整定及系统暂态稳定性具有深远影响。

4 故障暂态数学模型与波形特性

4.1 零序等值电路与暂态方程

为了揭示中性点不接地系统单相接地暂态过程的本质特征，可建立系统零序等值电路模型。设系统三相对地电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 ，总电容为 $C\Sigma$ 。当某一相发生接地故障时，故障相电容经接地点迅速放电，而其余两相电容则对地充电，从而形成零序回路。根据基尔霍夫电压定律，可得暂态电压方程：

$$C \sum \frac{dU_0}{dt} + \frac{U_0}{R_0} + L_0 \frac{d^2 U_0}{dt^2} = E(t)$$

其中 U_0 为零序电压， R_0 、 L_0 分别为系统等效阻抗与电感， $E(t)$ 为电源等效激励函数。该方程揭示了故障后零序电压随时间变化的动态规律，反映了电容充放电与感应电势之间的能量交换特性。通过求解该方程可分析故障初期电压振荡与稳态恢复过程，为暂态波形的频域分析与故障诊断提供理论依据。

4.2 暂态电流波形与频谱特征

单相接地暂态电流由工频电容电流与高频振荡分量叠加形成，呈明显的非正弦特征。故障发生瞬间，电容放电使

电流陡增，之后随电弧再燃呈周期性波动。仿真与试验结果表明，当电弧放电持续存在时，暂态电流波形中可观测到明显的高频振荡，其振荡频率可达数千赫兹。傅里叶频谱分析显示，电流信号中3次、5次及7次谐波分量幅值突出，电弧的非线性导通特性使波形畸变程度加剧。电流相位通常滞后于零序电压约 15° 至 30° ，体现出系统具有较强的感性响应特征。该频谱特征可作为判断电弧型单相接地故障的重要依据，对暂态检测与特征提取算法设计具有工程应用价值。

4.3 暂态过电压的形成条件与传播特性

暂态过电压是单相接地故障中最具破坏性的电气现象，其形成主要源于电弧放电引起的能量集中释放及线路分布参数产生的振荡效应。故障初期，电弧间隙瞬时电压急剧升高，配合线路分布电感、电容的能量反射作用，形成振荡性暂态过电压。其幅值与接地电阻、线路长度及系统电容密切相关。当接地电阻小于 $10\ \Omega$ 、线路长度超过 $5\ \text{km}$ 时，过电压峰值可达到额定相电压的3倍，严重威胁设备绝缘安全。该过电压在传播过程中会在分支点和终端处发生反射与叠加，形成局部电压尖峰。研究表明，若线路存在不均匀参数或多点接地，波形叠加效应将进一步放大过电压峰值。因此，深入分析暂态过电压的形成与传播特性，对于制定防护措施、优化绝缘设计和提升系统抗扰性具有重要意义。

5 单相接地暂态过程的影响因素与控制措施

5.1 接地电容与系统参数对故障特性的影响

电力系统中的对地电容是决定单相接地电流大小和暂态过程动态响应的重要因素，其变化直接影响故障能量分布及电弧稳定性。系统线路越长、分支越多，总对地电容越大，对应的电容电流也随之增加，使故障点电弧再燃概率显著上升。当电容电流超过 $15\ \text{A}$ 时，系统稳定性明显降低，暂态过电压峰值可增加约40%，并可能触发电容与电感之间的谐振现象。若系统参数匹配不当，还会导致零序电压频繁波动，进而引发高频暂态振荡，对设备绝缘构成威胁。通过在系统中实施合理的电容分段与电容补偿，可在保持系统供电连续性的同时有效降低能量积聚效应。实践表明，在分布式配电系统中采用分段接地与相间电容平衡技术，可显著减少暂态过电压幅值与持续时间，从而提高系统在单相接地工况下的整体电磁稳定性。

5.2 消弧线圈与接地装置的优化配置

消弧线圈作为中性点不接地系统的重要补偿装置，能够通过感抗调节抵消部分电容电流，从而实现零序电流的最小化，降低电弧重燃概率。其原理在于在单相接地故障发生

时，消弧线圈中感性电流与系统对地电容电流相互抵消，使接地点残余电流显著减小，故障电弧可在半波周期内自然熄灭。对于电容电流较大的系统，应采用可调式或自动调谐型消弧线圈，以实现针对不同运行状态下电容电流的动态匹配。同时，可在系统中设置高阻抗接地装置或动态补偿模块，对电弧能量进行吸收与限制，从而防止暂态电压升高。实际工程应用表明，在 $35\ \text{kV}$ 配电系统中引入可调消弧线圈后，单相接地持续时间缩短约70%，暂态过电压峰值下降至额定电压的1.4倍以下，显著改善了系统的运行安全性与可靠性。

5.3 故障检测与暂态监测技术的应用

单相接地故障具有隐蔽性强、持续时间短及信号特征复杂等特点，传统检测方法对瞬态信号识别能力有限。随着传感与数据处理技术的发展，基于零序电流方向、暂态特征波能量分析及小波包分解的检测方法逐渐成为主流。该类方法通过提取暂态信号的高频分量和能量分布特征，可实现故障相别与接地点的快速定位。结合光纤电流传感器和高速采样装置，可对故障全过程进行毫秒级数据捕获，准确反映系统暂态演化过程。近年来，人工智能算法的引入为故障诊断提供了新的思路。基于机器学习的数据驱动模型可通过历史样本训练实现故障类型识别与发展趋势预测。配合大数据分析可视化平台，可实现单相接地故障从发生到恢复的全过程智能监测与动态评估，为配电网智能化运维和中性点不接地系统的安全运行提供了有效技术支撑。

6 结语

中性点不接地系统在保证电力供电连续性方面具有显著优势，但单相接地故障的暂态特性复杂，易诱发电弧重燃与过电压风险。本文从理论建模与暂态仿真角度，分析了单相接地故障的成因、波形特征与能量传递规律，指出接地电容、线路参数及电弧特性是影响系统暂态稳定性的关键因素。研究表明，采用消弧线圈补偿、高阻抗接地及数字化监测手段，可有效降低过电压幅值与故障持续时间，提升系统安全性与可靠性。未来研究可在多节点配电网暂态协同、故障自愈与智能化防护方向进一步深化，以实现中性点不接地系统的安全、稳定与智能运行，为电力系统现代化建设提供技术支撑。

参考文献

- [1] 侯强民. 铁路中性点不接地电力系统故障选线技术探析[J]. 电力设备管理, 2025, (22): 224-226.
- [2] 马超. 中性点不接地系统铁磁谐振机理及抑制措施研究[D]. 山东大学, 2014.
- [3] 王青. 小电流接地系统单相接地故障的矢量融合与行波测距技术[D]. 湖南科技大学, 2010.