

基于谐波分量的小电流接地系统 单相接地故障选线研究

王月菴

(中水东北勘测设计研究有限责任公司)

摘要：为解决小电流接地系统中因故障电流微弱而导致故障线路与非故障线路特征差异不显著，进而影响选线结果可靠性的问题，提出基于谐波分量的小电流接地系统单相接地故障选线研究。通过分析谐波分量在小电流接地系统单相接地故障的暂态过程中的表现，并结合中性点电流电阻值，精确把握电流幅值。基于此，确定目标函数的度量距离限制值，以计算故障选线位置的隶属度函数，实现单相接地故障的准确选线。实验结果表明，基于谐波分量的选线结果完全吻合实际故障情况，证明该方法能够大幅提升故障检测的精度。

关键词：谐波分量；小电流；接地系统；单相接地；故障选线

2025.05.DQGY
79

0 引言

在电力系统中，小电流接地系统作为中压配电网的关键组成部分，广泛应用于变电站、工矿企业等场合^[1]，旨在减小系统接地电流，保障运行安全。然而，单相接地故障频发成为该类系统的一大挑战，不仅引发电压波动、电流失衡，还严重威胁着系统的稳定运行和设备安全。因此，对小电流接地系统的单相接地故障进行深入分析，并研究其选线方法具有重要意义。有专家提出基于多故障判据融合技术的小电流接地系统与单相接地故障选线方法，通过整合多种判据信息，能够在一定程度上削弱干扰，提升选线的抗干扰性^[2]，但其复杂的调试和维护流程限制了其广泛应用。基于零序电流分析的自动选线方法，则凭借其

对故障状况的直观反映，简化了选线流程^[3]。但在实际电网环境中，系统三相不平衡及负荷变化产生的零序电流，会影响选线的准确性。另外还有学者提出基于 CEEMD 模糊熵的小电流接地系统单相接地故障选线方法，通过 CEEMD 分解技术将复杂的暂态零序电流信号分解为多个本征模态函数，特别是高频分量 IMF1 的提取，在很大程度上提高了选线精度^[4]。然而，该方法涉及复杂的信号处理步骤，对计算资源和存储能力提出了较高要求。根据上述研究内容，本文提出一种基于谐波分量的小电流接地系统单相接地故障选线方法，该方法不受负荷电流和不平衡电流的影响，能够有效克服传统选线方法的不足，迅速确定并消除故障，降低设备损坏风险，提升选线精准度，增强系统稳定性，为智能电网的安全运行提供坚实保障。

1 基于谐波分量的小电流接地系统单相接地故障选线方法设计

1.1 分析小电流接地系统单相接地故障暂态过程

鉴于在稳态条件下谐波分量表现不显著,而暂态过程中则展现出显著的特征^[5],为此本文对小电流接地系统单相接地故障的暂态过程进行分析,深入理解故障发生初期的系统动态行为,有效规避稳态分析可能导致的特征模糊问题,以确保故障特征的准确提取。本文在单相接地故障发生的瞬间,利用等值回路图的方法,对小电流接地系统(包含单相接地故障)进行建模。通过构建这一等值回路图,进一步建立能描述暂态过程的电路理论微分方程,这些过程精确地刻画了电流、电压等电气量随时间变化的规律。利用拉普拉斯变换技术求解微分方程,能够得到暂态过程中各电气量的解析表达式:

$$b \frac{d^2 n}{dm^2} + e \frac{dn}{dm} + fn = G \quad (1)$$

式中, b 为等效电感; d 为拉普拉斯变换系数; m 为系统的运行时间; n 为输出的各电气量数据; e 为阻尼系数; f 为等效电容的倒数; G 为电压源。

1.2 确定中性点零序电流及其电阻值

中性点电流电阻值的变化可能会影响谐波分量的分布和幅值^[6]。特别是在经电阻接地的系统中,电阻的加入会改变系统的阻抗特性,从而影响谐波分量的传播和衰减。为了更准确地分析谐波分量并确定单相接地故障特征,本文对中性点电流电阻值进行确定。根据上文计算得到的各电气量数据,对中性点电流电阻值进行计算分析,设阻性电流为 I_1 , 对其零序电流进行计算,计算公式为:

$$I' = \frac{p}{\chi} - I_1 \quad (2)$$

式中, I' 为零序电流; p 为此时的相对地电压; χ 为系统中除中性点电阻外的总阻抗。使用欧姆定律

对零序电流结果进行分析,以此计算中性点电阻,计算公式为:

$$|R + (\chi - ws)| = I'U \quad (3)$$

式中, R 为中性点电阻; w 为系统中的虚部电抗; s 为中性点的虚数单位,且满足 $s^2 = -1$; U 为小电流接地系统电压。

1.3 基于谐波分量分析小电流接地系统各线路电流幅值

在前文分析的小电流接地系统单相接地故障暂态过程中,可以确定谐波分量的幅值和相位会随时间发生变化。这些谐波成分因其频率不同,受消弧线圈的影响也各异^[7],根据中性点电流电阻值精心设定消弧线圈的电抗值,具体的计算公式为:

$$A = \varepsilon \frac{1}{\alpha \sum I - \frac{U}{R}} \quad (4)$$

式中, A 为电抗值; ε 为基波角频率; α 为谐波分量的补偿系数。经过计算发现,消弧线圈与系统中分布电容在谐波频率下表现出显著的电抗特性反比关系,即当一方电抗增加时,另一方的电抗值则相应减少。基于这一特性,本文选取五次谐波、七次谐波和九次谐波作为分析对象,深入探究这些谐波频率下的特征表现。

使用高精度谐波检测装置对各条线路上的电流数据进行实时采集,并对采集到的数据进行预处理,包括滤波、去噪等步骤,以最大限度地削弱环境因素、设备老化及电磁干扰等带来的噪声和干扰信号,从而确保后续分析所依赖的基础数据质量。利用快速傅里叶变换方法,从预处理后的电流数据中提取出五次、七次和九次谐波分量。分别计算各条线路上三种谐波分量的具体幅值,将它们各自相加,得到每条线路的谐波幅值之和。比较各条线路的谐波幅值总和,根据比较结果中的显著差异,确定小电流接地系统单相接地的故障特征。

1.4 设计度量距离限制

为了提高计算效率,本文计算了度量距离的限制值,以设定一个合理的阈值。在检测过程中,一旦电气量数据超过此阈值,即判定为存在故障的可能性。将小电流接地系统在发生单相接地故障时的暂态过程相关数据,并基于这些数据构建一个度量空间,并在空间中计算所有数据点之间的距离和相似度信息。在 x 个小电流接地系统的电气量数据中,选择数据进行映射,并对第 y 个 DAE 后的重构误差进行计算,计算公式为:

$$q = \sum \eta j^2(\delta_1, \delta_2) + (1-\eta)p(\kappa - j(\delta_1, \delta_2))^2 \quad (5)$$

式中, q 为重构后的结果; η 为电气数据 δ_1 和 δ_2 电气数据是否属于同一类; p 为交叉损失函数, j 为两个电气数据之间的度量距离; κ 为惩罚项,取值为常数。已知小电流接地系统的重构误差与度量距离之间互为正则化项^[8],为了得到一个合理的度量距离阈值,需要将全部电气数据输入到 SDAE 模型中,按照电气数据的分类,分别计算并记录下这些数据在模型中的平均重构误差,并据此计算度量距离限制值,计算公式为:

$$\partial = \bar{q}' + \vartheta(\bar{q} - \bar{q}') \quad (6)$$

式中, ∂ 为度量距离限制值; $\bar{q}'$ 为零序电流的平均重构误差; $\bar{q}$ 为其余电气数据的平均重构误差; ϑ 为度量系数,通常是一个介于 0 和 1 之间的常数,用于平衡误报率和漏报率。

1.5 计算故障选线位置的隶属度函数

将所有超过度量距离限制的小电流接地系统线路电气的电气数据进行归纳,建立一个新的数据集。在此数据集中,中性点零序电流及其对应的电阻值被识别为判断单相接地故障的核心参数^[9],利用一种偏大型的二次抛物线型隶属函数来评估各条线路发生单相接地故障的可能性,以此选择小电流接地系统单相接地故障发生的线路。为每条超过度量距离限制且包含

单相接地故障特征数据的线路,针对其中性点的零序电流,定义了一个隶属函数,函数表达式为:

$$v = \begin{cases} \left(\frac{1}{\frac{\tau}{2} I'} \right)^2 \xi^2 & 0 \leq \xi < \frac{\tau}{2} I' \\ 1 & \xi \geq \frac{\tau}{2} I' \end{cases} \quad (7)$$

式中, v 为上述中性点零序电流的隶属函数; τ 为全新数据集中的线路总数量; ξ 为对应线路的谐波幅值之和。采用相同的方法,计算中性点电阻值以及其他相关电气量数据的隶属函数,并基于不同单相接地故障特征的重要程度,分析其对应权重,并计算加权后的隶属度总和。通过对比各条线路的加权隶属度总和,能够识别出其中明显异常的线路,这些异常线路即被定义为小电流接地系统中单相接地故障的选线结果。

2 仿真实验

2.1 实验准备

在本次基于谐波分量的小电流接地系统单相接地故障选线方法的仿真测试中,使用 EMTDC 电力仿真软件作为测试平台,建立如图 1 所示的小电流接地系统仿真模型。

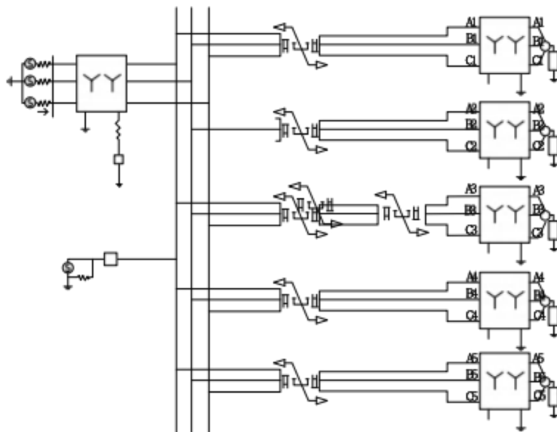


图 1 实验用小电流接地系统仿真模型

为了确保实验过程能够及时调控并平衡故障电流，以及在单相接地时有效熄灭弧光，需要在实验用的小电流接地系统仿真模型中增设一个运行稳定可靠的消弧线圈，并保证消弧线圈位置能够顺利投入和退出。同时对相关的仿真设备参数进行设置，具体参数如表 1 所示。

表 1 实验用小电流接地系统参数设置

参数名称	符号	单位	数值
系统额定电压	U_N	kV	10
系统最高运行电压	U_{max}	kV	11.5
系统频率	f	Hz	50
线路总长度	L_{tot}	km	10
架空线比例	C/O	%	50/50
单相接地电容电流	I_c	A	10
消弧线圈电感值	L	H	10
消弧线圈过补偿度	δ	%	5
系统接地方式	-	-	小电流接地
负载总功率	P_{tot}	kW	200
负载功率因数	$\cos\phi$	-	0.9
零序阻抗	Z_0	Ω/km	0.5
土壤电阻率	ρ	$\Omega\cdot\text{m}$	100
消弧线圈电流补偿范围	-	A	± 5

根据表 1 设置模型的初始条件，在模型中设置 10 个具有不同参数的单相接地故障点。启动仿真模型后，分别使用本文设计的基于谐波分量的小电流接地系统单相接地故障选线方法、基于多故障判据融合的小电流接地系统单相接地故障选线方法以及基于 CEEMD 模糊熵的小电流接地系统单相接地故障选线方法对模型进行故障选线，并记录选线结果。

2.2 实验结果

三种不同方法的小电流接地系统单相接地故障选线结果如表 2 所示。

表 2 小电流接地系统单相接地故障选线结果

故障点 序号	实际故障 选线	本文基于谐波 分量的小电流 接地系统单相 接地故障选线 方法选线	基于多故障判 据融合的小电 流接地系统单 相接地故障选 线方法选线	基于 CEEMD 模 糊熵的小电流接 地系统单相接地 故障选线方法选 线
1	A3	A3	B3	A3
2	C1	C1	C1	A5
3	C3	C3	C3	B2
4	C3	C3	C3	A4
5	A2	A2	C3	C2
6	B2	B2	A3	A3
7	B1	B1	B1	C1
8	C5	C5	A4	A5
9	B4	B4	C2	A1
10	A5	A5	A5	B

根据表 2 结果可见，在多种小电流接地系统单相接地故障选线方法中，本文所设计的基于谐波分量的选线方法展现出卓越的性能，其选线结果完全吻合实际故障情况。相比之下，基于多故障判据融合的方法仅有 50% 的选线结果与实际相符，而基于 CEEMD 模糊熵方法的选线结果与实际相符的比例仅为 10%。这一对比结果凸显基于谐波分量选线方法的优越性，证明本文设计的方法，在不受系统噪声、谐波污染等外部干扰因素的影响下，通过精确分析故障电流中的谐波成分，成功实现了对故障线路的有效识别，为电力系统的故障排查与修复工作提供有力的技术支持，有助于减少故障停电时间，提高供电可靠性，进一步提升电网运维的智能化水平。

3 结束语

本文精准地提取出故障发生时的特定谐波分量，分析这些分量在故障线路与非故障线路之间的显著差异，构建一套高效、准确的故障识别算法，实现了故障线路的精准定位，也显著优化了小电流接地系统单相接地故障的选线过程。有效排除了负荷电流和不平衡电流的干扰，极大地提高了选线的灵敏度和稳定性，即使在复杂多变的负荷及电流分布情况下，依然能够保持高度的准确性和可靠性，为电力系统的安全稳定运行奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 高文利, 郑李南. 配电网单相接地故障选线技术研究综述 [J]. 科技与创新, 2023 (15): 18-22.
- [2] 叶伟权. 基于多故障判据融合的小电流接地系统单相接地故障选线研究 [J]. 电工技术, 2022 (11): 7-9.
- [3] 张士林. 基于零序电流分析的小电流接地系统单相接地故障自动选线方法 [J]. 企业科技与发展, 2023 (11): 59-62.
- [4] 刘天宇, 孙晓东. 基于 CEEMD 模糊熵的小电流接地系统单相接地故障选线方法 [J]. 中国新技术新产品, 2023 (24): 79-82.
- [5] 徐海松, 张大宁, 胡冉, 等. 基于谐波分量的配电电缆绝缘劣化状态带电检测技术 [J]. 电工技术学报, 2024, 39 (7): 2161-2173.
- [6] 薛林燚, 牟龙华, 徐瑞洁. 谐波分量注入式微电网控保协同技术研究 [J/OL]. 电源学报, 1-12[2024-09-19].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240425.1822.012.html>.
- [7] 关荣根. 小电流接地系统单相接地故障特征分析及其应用 [J]. 水电与新能源, 2023, 37 (10): 39-42.
- [8] 刘小亮, 朱浩男, 艾先政. 小电流接地系统单相接地故障快速处置改造 [J]. 电工技术, 2023 (S1): 91-92, 95.
- [9] 李根. 小电流接地系统单相接地故障处理技术研究 [J]. 企业科技与发展, 2022 (10): 81-83.

(收稿日期: 2024-09-19)