

[集成学习]

基于集成学习的电力系统小电流接地故障自动定位方法

文/郭加卿
国网上海市电力公司

为实现对小电流接地故障的精准定位，降低由于小电流接地故障导致的电力系统供电服务异常，引进集成学习技术，以某电力系统为例，设计一种针对小电流接地故障自动定位方法。对比实验结果表明：设计的故障自动定位方法不仅可以实现对架空线路接地故障区段的精准识别与诊断，还可以控制小电流接地故障的自动定位误差，提高故障点的定位准确度。

电能是与人类生活密切相关的能源，也是现代社会中应用最为广泛的能源之一。随着现代化科技的发展，群体日常生活对电能的依赖性越来越强。因此，电网的稳定运行对保障社会各部门的正常运转具有十分重要的意义。当前，国内中、低压配电网大多采用不接地或通过消弧线圈产生谐振的接地方式。在深入市场相关研究中发现，单相接地故障占电力系统故障的比例最大，大约超过80%。配电网在发生小电流单相接地故障时，接地电流很小，三相系统的线电压可以保持对称，不影响正常供电，短间接地也不会引起开关跳闸，使供电仍具有较高的可靠性。但在此过程中，如供电技术人员不采取有效措施进行故障的处理与排查，电力系统在长时间运行的情况下，极易导致非故障相电压升高，从而造成绝缘损坏。严重情况下，甚至会发展成为电力系统在运行中的相间故障。总之，准确、及时地定位并排除故障，对于电网稳定运行具有积极的作用。近年来，随着国家电网建设改造工作的不断推进，以及城市发展的多样化趋势，配电网中电缆数量越来越多，输电网的网络结构更为复杂、分支量更大，且大量采用缆线、架空线-缆混联等多种形式，导致传统的配电系统故障检测方法难

以适用。为解决此方面的不足，本文引进集成学习技术，以某电力系统为例，设计一种针对小电流接地故障的全新的自动定位方法，实现对电网运行的全面优化。

电力系统供电区段暂态电流幅值特征提取

为实现对系统中小电流接地故障的精准定位，设计方法前，应先进行电力系统供电区段暂态电流幅值特征的提取，计算供电区段暂态电流的有效值。计算公式为

$$M = \frac{m_1}{m_2} \quad (1)$$

式中， M 为供电区段暂态电流的有效值； m_1 、 m_2 为上、下游监测点暂态电流有效值。

在此基础上，根据监测点与零序电流的峰值比，进行暂态零序电流峰值的计算，计算公式为

$$I_1 = U_m \omega M C_1 \sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega} \sin \varphi\right)^2 + \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

式中， I_1 为暂态零序电流峰值； U_m 为虚拟电压幅值； ω 为工频频率； C_1 为健全区段； ω_1 为故障点下游谐振主频率； φ 为故障初相角。

将计算结果 I_1 作为特征点，以此为依据，进行

暂态电流幅值的计算。计算公式为

$$F(I_1) = U_m \omega C_2 \quad (3)$$

式中, F 为暂态电流幅值; C_2 为 C_1 的邻近区段。

按照上述方式得到计算结果, 完成电力系统供电区段暂态电流幅值特征的提取。

基于集成学习的电流样本数据训练与分类

完成上述内容的设计后, 引进集成学习算法, 统计并整理上述提出的电力系统供电区段暂态电流幅值特征, 将其作为电流样本数据, 设计电流样本数据的训练与分类。在此过程中, 将样本数据总数表示为 N , 在明确 N 的构成与样本中的特征向量后, 设定样本的标签类别, 对其进行集成训练, 训练过程计算公式为

$$D(N) = \frac{F}{N(K-1)} \quad (4)$$

式中, $D(N)$ 为电流样本数据 N 的训练; K 为类别数。

在上述内容的基础上, 考虑到样本训练存在一定的损失, 为避免数据损失对故障诊断与定位造成影响, 需要进行训练中伪损失的计算, 计算公式为

$$P = \frac{1}{2} [1 - h(x, y) + D(N)] \quad (5)$$

式中, P 为样本训练中的伪损失; h 为训练决策树; (x, y) 为样本数据中接地点对应的坐标。

最后, 采用更新 (x, y) 权重的方式, 进行电流样本数据训练后的分类, 分类过程计算公式为

$$f = \arg \max_{T \geq 1} \lg P(1/\beta) h(x, y) \quad (6)$$

式中, f 为电流样本数据训练后的分类; T 为强分类器; β 为基分类器个数。

按照上述方式, 完成基于集成学习的电流样本数据的训练与分类。

信号电流注入与小电流接地故障距离计算

在上述设计内容的基础上, 为更加精准地寻找接地点, 根据故障检测的需求, 在相位点注入交流信号电流, 注入的电流在支路上将发生扩散。此时, 通过追踪注入信号电流的扩散方向, 掌握精确的小电流接地故障点。在存在异常特征信号的线路上追踪电流, 注入电流消失的位置即为小电流接地

故障点。当遇到分支路时, 可以在分支点附近对每一条分支路进行探测, 并将探测到的含有信号电流的分支路称为故障分支路。通过对支路的探测判断出该分支的故障, 并将该分支的探测结果与实际情况相吻合。在故障点定位后, 小电流接地距离为

$$J = \sqrt{2} f \sin(w't + \delta) \quad (7)$$

式中, J 为小电流接地故障距离; w' 为分支点; t 为追踪时刻点; δ 为角频率。

按照上述方式, 实现信号电流注入与小电流接地故障距离计算, 完成基于集成学习的小电流接地故障自动定位。

对比实验

为排除实验中相关因素对实验结果的影响, 本次小电流故障接地自动定位实验在MATLAB软件上进行, 实验中, 辅助ATP-EMTP, 在计算机中建立电力系统小电流接地故障模型, 绘制小电流接地故障线路图简图, 如图1所示。

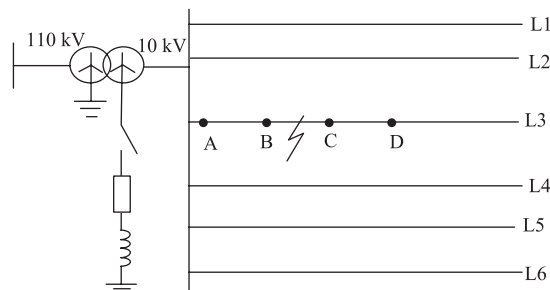


图1 电力系统小电流接地故障线路模型

从图1可以看出, 本次构建的电力系统小电流接地故障线路模型共有6条架空出线, 小电流接地故障线路为L3出线, L3上的A、B、C、D为对应的4个检测点, B点与C点之间存在显著的接地故障。其中A点与B点、B点与C点、C点与D点之间的距离分别为4 km, D点到L3出线终端的距离为8 km。在掌握小电流接地故障线路模型的基本情况, 对电力系统在运行中的参数进行模拟, 模拟参数取值见表1。

在上述内容的基础上, 考虑到变压器是电力系统中的主要构成部件之一, 为保证实验中电力系统的稳定运行, 按照表2对电力系统中变压器运行参数进行设计。

表1 电力系统的整体运行参数设计

序号	项目	参数
1	配电系统结构	辐射形供电网络
2	系统电压比	110 kV/10 kV
3	6条架空出线对应的长度	L1:9 km/L2:15 km/L3:20 km /L4:12 km/L5:14 km/L6:10 km
4	变压器	Y/Y0形接线
5	区段电纳与线路总电纳	5%
6	线路正序阻抗	$0.17+j0.38\ \Omega/\text{km}$
7	正序对地导纳	$3.045\ \mu\text{S}/\text{km}$
8	零序阻抗	$0.23+j1.72\ \Omega/\text{km}$
9	零序对地导纳	$1.854\ \mu\text{S}/\text{km}$

表2 变压器运行参数

序号	项目	参数
(1)	额定容量/(kV·A)	4.0×10^4
(2)	空载损耗/kW	35.63
(3)	高压侧单相对中性点线圈电阻/ Ω	0.4
(4)	高压侧线圈电感/ Ω	12.2
(5)	低压侧单相线圈电阻/ Ω	0.006
(6)	低压侧线圈电感/ Ω	0.185
(7)	励磁电流/A	0.672
(8)	励磁磁通/Wb	202.1
(9)	磁路电阻/k Ω	400

完成上述准备工作后,使用本文设计的方法进行小电流接地故障自动定位。检测中,先进行电力系统供电区段暂态电流幅值特征提取。同时,引进集成学习,进行电流样本数据训练与分类。最后,计算信号电流注入与小电流接地故障的距离。在此过程中,设计模型对小电流接地的采样频率为100 kHz,按照此标准,采集AB段、BC段、CD段的零模电流波形,如图2~图4所示。

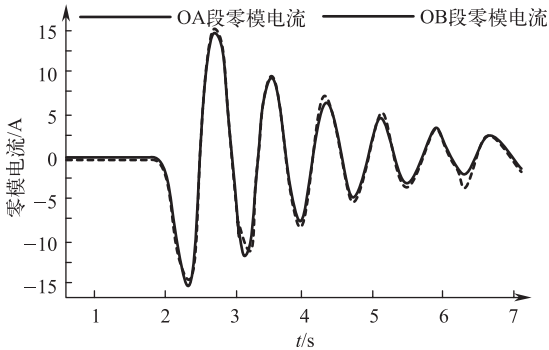


图2 AB段零模电流波形

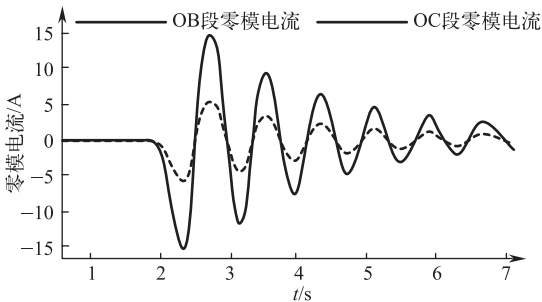


图3 BC段零模电流波形

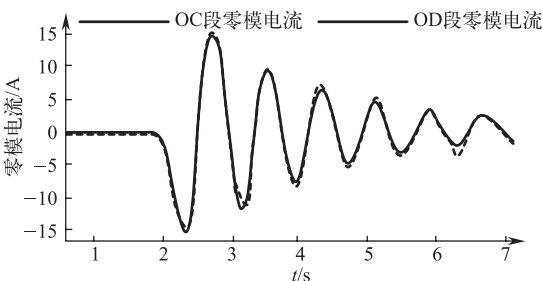


图4 CD段零模电流波形

从图2~图4可以看出,三段零模电流波形中,只有BC段零模电流波形中OC段零模电流与OB段零模电流存在差异,而AB段、CD段中的OA段零模电流与OB段零模电流、OC段零模电流与OD段零模电流几乎完全重叠。由此可以诊断电力系统小电流接地故障线路模型中,BC段之间存在小电流接地故障。通过上述方式,验证了本文设计的方法可以实现对电力系统中小电流接地故障的精准诊断。在此基础上,引进基于改进小波阈值函数的故障定位方法、基于零序电流特性的故障定位方法,将其作为传统方法1、传统方法2,使用本文方法与传统方法进行小电流接地故障自动定位。在已知故障点的前提下,统计三种方法对小电流接地故障的自动定位误差,实验结果见表3。

表3 小电流接地故障的自动定位误差

(单位: m)

故障点	本文方法故障自动定位偏差	传统方法1故障自动定位偏差	传统方法2故障自动定位偏差
1	0.05	0.45	1.05
2	0.14	0.89	1.39
3	0.09	0.72	0.96
4	0.12	0.48	0.98
5	0.15	0.39	1.05
6	0.06	0.47	0.98
7	0.11	0.88	0.88

从表3可以看出,本文设计的定位方法对小电流接地故障的自动定位误差最小,而两种传统方法对小电流接地故障的自动定位误差偏大。因此,相比传统方法,本文设计的基于集成学习的故障自动定位方法,在进行电力系统小电流接地故障定位时,不仅可以实现对架空线路接地故障区段的精准识别与诊断,还可以控制小电流接地故障的自动定位误差,提高故障点的定位准确度。

结束语

配电网是电力系统中的核心,其运行状况对电力系统的可靠性和供应的电能质量具有直接的影响。在小电流接地配电网中,由于电路不能形成短路环,也不能利用消弧线圈对输电线路进行补偿,导致线路的故障电流相对较小。在现实中,单相接地故障电流一般仅为数十安培。由于小电流接地配电网中的稳态零序电流很小,而且故障特征很弱,很难辨别。因此,为故障诊断工作带来了很大困难,尤其是对故障点的精确定位,更是学术界普遍认可的难题。为解决小电流接地故障,全面提高电网运行的可靠性,本文引进集成学习技术,以某电力系统为例,通过电力系统供电区段暂态电流幅值特征提取、电流样本数据训练与分类、信号电流注入与小电流接地故障距离计算,设计了一种针对小电流接地故障的全新的自动定位方法。对比实验证明,该方法不仅可以实现对架空线路接地故障区段的精准识别与诊断,还可以控制小电流接地故障的自动定位误差。EA

(收稿日期:2023-08-04)

参考文献

[1] 黄岗,邓德茂,彭洪进,等.一起110 kV线路发展性故障导致220 kV主变保护动作的事故分

析[J].农村电气化,2023(7):16-18.
[2] 张东晖,姚阳,杨朝翔,等.基于浮地系统接地特征识别算法的直流漏电流传感保护模块性能参数测试[J].电瓷避雷器,2023(3):83-90.
[3] 朱勇,竺裕峰,林启新,等.基于改进小波阈值函数的典型输电线路故障波形去噪分析[J].电气应用,2023,42(6):33-40.
[4] 任宝珠,徐从谦,姜宋阳,等.铁路车辆牵引主回路接地故障诊断与处理半实物仿真系统设计[J].铁道机车车辆,2023,43(3):32-38.
[5] 王雪芹,张大海,李猛,等.基于小波能量谱和SSA-GRU的混合直流输电系统故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):14-24.
[6] 黄亚峰,王浩天,朱登宝,等.基于零序电流特性的中性点灵活接地系统的故障选线方法[J].东北电力大学学报,2023,43(3):16-22,71.
[7] 钟素梅.基于PSCAD的城轨交通35 kV供电系统接地故障及其保护的仿真分析[J].黑龙江电力,2023,45(3):216-221.
[8] 姚立波.基于分布非接触测量的配电线路接地及短路故障区段定位技术[J].科学技术创新,2023(14):85-88.
[9] 甘战,邓应开,王小江.一起分布电容导致站用直流电源系统故障事件的原因分析与改进[J].自动化应用,2023,64(10):102-104.
[10] 高学洪,肖先照,王荣,等.某抽水蓄能电站水轮发电机转子一点接地故障分析与处理[J].水电站机电技术,2023,46(5):76-78.
[11] 尹扬,薛涛.基于投切装置的小电流接地故障定位方法研究[J].电气应用,2021,40(6):88-94.

