

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241581

考虑分布式电源接入的配电网有源电压消弧技术

齐 郑¹, 张淇钰¹, 兰冠仪²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT)

摘要: 针对现有配电网有源电压消弧方法未充分考虑线路电压降落以及分布式电源接入的影响, 发生单相接地故障时无法保证故障点电压为 0, 存在无法可靠消弧的问题, 提出了一种考虑分布式电源接入的配电网有源电压消弧技术。首先, 在接入分布式电源的基础上, 考虑线路的电压降落, 推导消弧电压理论计算公式, 提出改进有源电压消弧方法。其次, 提出一种基于馈线终端设备(feeder terminal unit, FTU)量测数据的数据驱动测距方法, 能够在故障发生后准确计算出故障距离, 为消弧线圈的控制提供数据。最后, 通过仿真证明所提方法相较于传统有源电压消弧方法, 能够更好地控制故障点电压为 0。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 分布式电源; 有源电压消弧; 数据驱动

Active voltage arc suppression technology for distribution networks considering distributed generation integration

QI Zheng¹, ZHANG Qiyu¹, LAN Guanyi²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT)

Abstract: Existing active voltage arc suppression technologies for distribution networks often fail to fully consider the effects of line voltage drop and distributed generation (DG) integration. As a result, during single-phase-to-ground faults, these methods cannot guarantee zero voltage at the fault point, resulting in unreliable arc suppression. To address this issue, this paper proposes a new active voltage arc suppression technology for distribution networks with DG integration. First, based on the access of DG and considering line voltage drop, the theoretical calculation formula for the arc suppression voltage is derived, and an improved active voltage arc suppression method is proposed. Second, a data-driven distance measurement method based on feeder terminal unit (FTU) measurement data is proposed, which can calculate the fault distance after a fault occurs, providing accurate data for controlling the arc suppression coil. Finally, simulation results show that the proposed method is more effective in controlling the fault voltage to zero than traditional active voltage arc suppression techniques.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2601501).

Key words: distribution network; single-phase-to-ground fault; distributed generation; active voltage arc suppression; data driven

0 引言

单相接地故障作为配电网故障概率最高的故障, 占全部故障的 80%以上^[1-2]。为提高配电网供电可靠性, 我国越来越多的中压配电网采用中性点经消弧线圈接地方式^[3-4]。在发生单相接地故障时, 消弧

线圈通过提供感性无功分量有效补偿故障引起的接地电容电流, 有助于电弧的快速熄灭^[5]。但传统消弧线圈作为无源消弧装置, 仅能补偿故障电流中的容性分量, 并且为了防止发生串联谐振, 消弧线圈通常设置为过补偿 5%。故障残流的存在导致接地电弧持续燃烧, 对电力系统的安全运行构成严重威胁^[6-7]。

为解决无源消弧装置的不足, 有学者提出了有源电压消弧与有源电流消弧技术。文献[8]分析配电

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2601501)

网单相接地故障零序导纳变化规律，向系统注入零序电流以抑制故障电流。但基于注入电流的有源电压消弧技术存在对不同系统结构泛用性较差的问题^[9]，而有源电压消弧技术以故障相电压为控制目标，抑制故障相电压至 0，受线路结构影响较小。文献[10]采用闭环控制调控中性点电压，结合故障电压电流特性，设计注入电流反馈控制环节，实现对不平衡电压的快速精确抑制。文献[11]基于注入电流与零序电压的约束关系，提出一种柔性调控零序电压的有源配电网消弧检测技术。文献[12]结合线路对地参数，提出一种计及线路参数影响的电压消弧方案，具有控制故障电压为零的消弧能力。文献[13]通过监测接地电阻与零序电压等故障特征，提出自适应线路参数的全补偿消弧方法。但上述方法均未考虑多分支线路和分布式电源接入的影响。

为了保证能够将故障点电压限定为 0，在研究计及线路电压降落的有源电压消弧方法时，需要精确地获取故障点距离信息并据此调整有源消弧装置。现有研究在配电网故障测距领域主要分为行波法^[14-17]和阻抗法^[18]两种。行波法的缺点在于高采样率装置成本较高，特别是双端行波定位需要每个分支末端都安装设备，投资较大，阻抗法的综合性价比比较高。文献[19]考虑接地电阻功率因数为 1 的特性，基于此推导测距方程，但未考虑不同接地方式以及过渡电阻较大情况的影响，测距结果的准确性无法保证。文献[20]将阻抗法与行波法相结合，以故障指示器判断故障所在区段，分别使用双端行波

法、阻抗法对主线路、支路故障进行测距，实现多分支线路的故障定位，但须安装较多行波采样设备。文献[21]构建分区修正的边缘计算单元配置优化模型，选取相电流故障前后的变化量作为故障特征，将智能算法应用于配电网故障区段定位，但未考虑分布式电源接入的影响，同时以故障区段定位为目标无法满足测距精确性的要求。

为解决现有问题，本文提出一种基于数据驱动的配电网有源电压消弧技术，在计及线路电压降落的前提下，研究分布式电源接入的多分支配电网有源消弧机理，提出基于零序等效电路的消弧电压计算方法；结合卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)与长短期记忆(long short term memory, LSTM)神经网络，构建数据驱动测距模型，通过馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)采集故障运行数据，得到故障距离，进而精准计算当前故障下消弧电压的目标值。最后，针对不同故障距离和接地电阻场景建立故障模型进行仿真验证，结果表明本文所提有源电压消弧技术可以实现配电网故障的快速定位与完全消弧，测距精度高且具有良好的消弧效果，适用于分布式电源接入的多结构配电网，验证了本文所提方法的正确性。

1 分布式能源接入的多分支线路消弧原理

中性点经有源消弧装置接地的多分支有源配电网等效电路如图 1 所示。有源消弧装置经接地变压器安装于母线处，采用主从式消弧线圈结构。

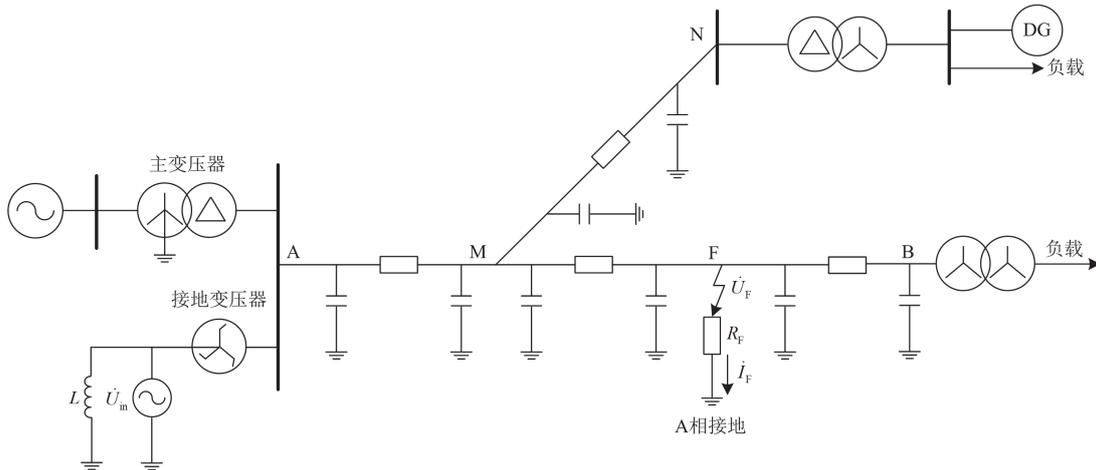


图 1 多分支中压配电网等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of multi-branch medium voltage distribution network

有源消弧装置的主消弧线圈为传统可调消弧线圈，用 L 表示，消弧线圈由电压源逆变器构成，可等效为幅值和相角可控的电压源，用 \dot{U}_m 表示。

线路采用集中参数 π 型等值电路，能够准确反映线路的阻抗、电压降落和线路各点的电容电流。以 A 相发生接地故障为例， \dot{U}_F 、 \dot{I}_F 分别为故障点电压、

电流; R_F 为接地电阻。

1.1 单相接地故障有源消弧原理

将图 1 简化为图 2 所示等效电路图。本节分析及线路阻抗的有源电压消弧原理, 由于故障电流只在对地回路中流通, 负载及分布式电源的电流基本不受接地故障的影响, 因此仅需考虑对地电流情况。

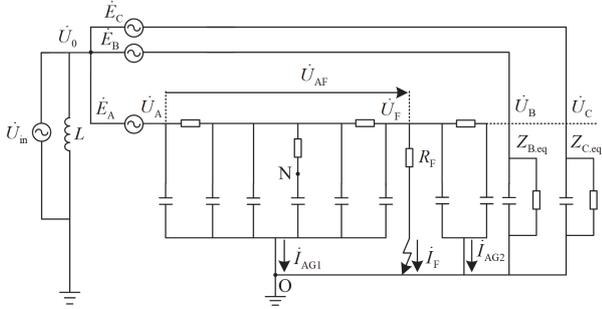


图 2 A 相接地故障等效电路图

Fig. 2 A ground fault equivalent circuit diagram

图 2 中: \dot{U}_0 为中性点电压; \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 为归算至低压侧的电源电动势; \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 分别为三相母线电压; \dot{U}_{AF} 为故障相母线至故障点的线路电压降落; 将 B、C 两相的线路阻抗以 $Z_{B,eq}$ 、 $Z_{C,eq}$ 等效替代; \dot{I}_{AG1} 、 \dot{I}_{AG2} 分别为 A 相故障点前、后区段的对地电流。

由图 2 可知 $\dot{U}_A = \dot{U}_0 + \dot{E}_A$, $\dot{U}_F = \dot{U}_A - \dot{U}_{AF}$, 有

$$\dot{U}_F = \dot{U}_0 + \dot{E}_A - \dot{U}_{AF} \quad (1)$$

当故障点电压为 0 时满足式(2)。

$$\dot{U}_{in} = \dot{U}_0 = -\dot{E}_A + \dot{U}_{AF} \quad (2)$$

综上, 考虑线路电压降落的影响, 将中性点电压控制为故障相电源电压的负值与故障相母线至故障点的线路电压降落之和, 可将故障点电压控制为 0。而传统的有源电压消弧技术未考虑线路阻抗电压降落的影响, 仅将中性点电压控制为故障相电源电压的负值, 即 $\dot{U}_0 = -\dot{E}_A$, 该方法并不能有效地将故障点的电压控制为 0, 导致故障点存在残余电压, 影响消弧效果。为精确抑制故障点电压至 0, 关键在于求得母线至故障点间的电压降落, 为此须进一步研究电压降落的求解方法。

1.2 母线至故障点电压降落求解方法

1.2.1 无源无分支线路

图 3 为无源无分支线路正常运行时 A 相的等效电路图, 有源消弧装置不投入运行。电压和电流的正方向为从电源流向负载。 \dot{I}_A 为线路 AB 首端的相电流, 可以通过测量设备得到; \dot{I}_{AF} 、 \dot{I}_{FB} 分别为故障点前、后区段长度。

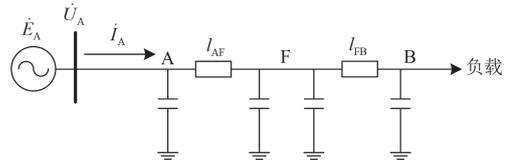


图 3 无源无分支线路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of passive no branch line

当正常运行时, 根据电路基本定理, 可以计算故障线路母线至故障点的电压降落 \dot{U}_{AF} 及故障点电压 $\dot{U}_{F|0}$ 。

$$\begin{cases} \dot{U}_{AF} = (\dot{I}_A - \dot{U}_A Y_{AF}) Z_{AF} \\ \dot{U}_{F|0} = \dot{U}_A - \dot{U}_{AF} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$Z_{AF} = Z_1 l_{AF} \quad Y_{AF} = j\omega C_1 \frac{l_{AF}}{2} \quad (4)$$

式中: Z_{AF} 为故障点前区段线路的正序阻抗; Y_{AF} 为故障点前区段线路 A 侧的正序对地导纳; Z_1 、 C_1 分别为单位长度线路的正序阻抗、电容; $\dot{U}_{F|0}$ 为故障点正常运行电压。

图 4 为 A 相发生单相接地短路故障时的零序等效电路图, 有源消弧装置投入运行。在零序等值电路中, 故障点通常采用电压源 $-\dot{U}_{F|0}$ 与接地电阻 R_F 串联的方式进行等效表示。接地变压器采用 ZNyn 接线, 零序阻抗忽略不计^[22-23]。

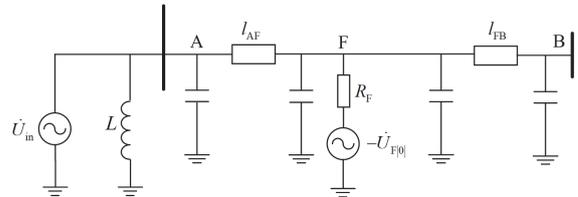


图 4 无源无分支线路等效零序电路图

Fig. 4 Equivalent zero-sequence circuit diagram of passive no branch line

$$\begin{cases} Z_{AF0} = Z_0 l_{AF} & Y_{AF0} = j\omega C_0 \frac{l_{AF}}{2} \\ Z_{FB0} = Z_0 l_{FB} & Y_{FB0} = j\omega C_0 \frac{l_{FB}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z_{AF0} 、 Z_{FB0} 分别为故障点前、后区段线路的零序阻抗; Y_{AF0} 、 Y_{FB0} 分别为故障点前区段线路 A 侧和故障点后区段线路 F 侧的零序对地导纳; Z_0 、 C_0 分别为单位长度线路的零序阻抗、电容。

当发生单相接地短路故障, 根据节点电压法得

$$\dot{U}_{F0} \left(Y_{AF0} + Y_{FB0} + \frac{1}{Z_{AF0}} + \frac{1}{R_F} + \frac{1}{Z_{FB0} + \frac{1}{Y_{FB0}}} \right) - \frac{\dot{U}_{A0}}{Z_{AF0}} = -\frac{\dot{U}_{F0|}}{R_F} \quad (6)$$

式中： \dot{U}_{F0} 为故障点的零序电压； \dot{U}_{A0} 为线路首端的零序电压。当故障点电压为0时，有 $\dot{U}_{F0} = -\dot{U}_{F0|}$ 。

根据图4可知 $\dot{U}_{in} = \dot{U}_{A0}$ ，将 $\dot{U}_{F0} = -\dot{U}_{F0|}$ 代入式(6)，可以得到消弧电压 \dot{U}_{in} 的表达式为

$$\dot{U}_{in} = -\dot{U}_{F0|} \left[1 + Z_{AF0} \left(Y_{AF0} + Y_{FB0} + \frac{1}{Z_{FB0} + \frac{1}{Y_{FB0}}} \right) \right] \quad (7)$$

由式(7)可知，消弧电压 \dot{U}_{in} 与 R_F 无关，消弧电压计算方法对不同接地电阻的故障情况均适用。

1.2.2 无源多支配电网

图5为考虑线路分支的无源配电网正常运行时A相的等效电路图。 l_{AM} 、 l_{MN} 分别为线路AM、MN的长度； l_{MF} 、 l_{FB} 分别为故障线路MB故障点前、后区段长度； \dot{U}_M 、 \dot{i}_M 分别为线路MN首端的相电压和相电流。

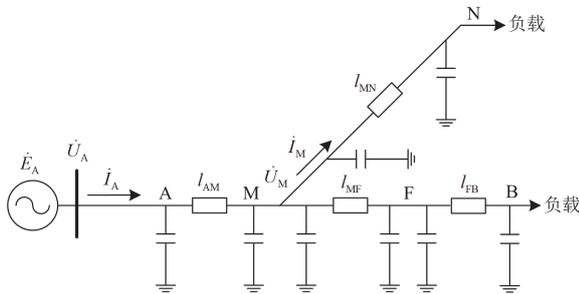


图5 无源多支配电网等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of passive multi-division distribution network

当配电网正常运行时，各电气量满足式(8)。

$$\begin{cases} Z_{AM} = Z_1 l_{AM}, Y_{AM} = j\omega C_1 \frac{l_{AM}}{2} \\ Z_{MF} = Z_1 l_{MF}, Y_{MF} = j\omega C_1 \frac{l_{MF}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{AM} = (\dot{I}_A - \dot{U}_A Y_{AM}) Z_{AM} \\ \dot{U}_{MF} = [\dot{I}_A - \dot{U}_A Y_{AM} - \dot{i}_M - \dot{U}_M (Y_{AM} + Y_{MF})] Z_{MF} \end{cases} \quad (9)$$

式中： Z_{AM} 、 Y_{AM} 分别为线路AM的正序阻抗和A侧正序对地导纳； Z_{MF} 、 Y_{MF} 分别为故障点前区段线路的正序阻抗和M侧正序对地导纳； \dot{U}_{AM} 为线路AM阻抗上的电压降落； \dot{U}_{MF} 为故障点前区段线路

阻抗上的电压降落。

计算故障线路母线至故障点的电压降落 \dot{U}_{AF} 及故障点电压为 $\dot{U}_{F0|}$ ，如式(10)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{AF} = \dot{U}_{AM} + \dot{U}_{MF} \\ \dot{U}_{F0|} = \dot{U}_A - \dot{U}_{AF} \end{cases} \quad (10)$$

图6为A相发生单相接地短路故障时的零序等效电路。

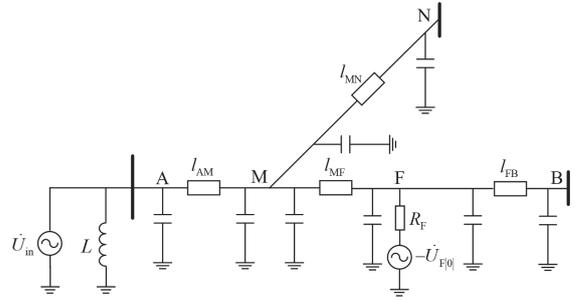


图6 无源多支配电网等效零序电路图

Fig. 6 Equivalent zero-sequence circuit diagram of passive multi-division distribution network

$$\begin{cases} Z_{AM0} = Z_0 l_{AM} & Y_{AM0} = j\omega C_0 \frac{l_{AM}}{2} \\ Z_{MN0} = Z_0 l_{MN} & Y_{MN0} = j\omega C_0 \frac{l_{MN}}{2} \\ Z_{MF0} = Z_0 l_{MF} & Y_{MF0} = j\omega C_0 \frac{l_{MF}}{2} \\ Z_{FB0} = Z_0 l_{FB} & Y_{FB0} = j\omega C_0 \frac{l_{FB}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中： Z_{AM0} 、 Z_{MN0} 、 Y_{AM0} 、 Y_{MN0} 分别为线路AM、MN的零序阻抗和A侧、M侧零序对地导纳； Z_{MF0} 、 Z_{FB0} 、 Y_{MF0} 、 Y_{FB0} 分别为故障点前、后区段线路的零序阻抗和M侧、B侧零序对地导纳。

当发生单相接地短路故障时，根据电路基本定理列写节点电压方程，如式(12)所示。

$$\begin{cases} 0 = -\frac{\dot{U}_{A0}}{Z_{AM0}} + \dot{U}_{M0} \left(\frac{1}{Z_{AM0}} + \frac{1}{Z_{MF0}} + Y_{AM0} + Y_{MN0} + Y_{MF0} + \frac{1}{Z_{MN0} + \frac{1}{Y_{MN0}}} \right) - \frac{\dot{U}_{F0}}{Z_{MF0}} \\ -\frac{\dot{U}_{F0|}}{R_F} = \dot{U}_{F0} \left(\frac{1}{Z_{MF0}} + \frac{1}{R_F} + Y_{MF0} + Y_{FB0} + \frac{1}{Z_{FB0} + \frac{1}{Y_{FB0}}} \right) - \frac{\dot{U}_{M0}}{Z_{MF0}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: \dot{U}_{M0} 为线路 MN 首端的零序电压。

根据零序电路图可知 $\dot{U}_{in} = \dot{U}_{A0}$, 将 $\dot{U}_{F0} = -\dot{U}_{F|0}$ 代入式(12), 可得消弧电压 \dot{U}_{in} 的控制目标值, 如式(13)所示。

$$\dot{U}_{in} = \dot{U}_{F|0} Z_{AM0} \left[\frac{1}{Z_{MF0}} - \left(\frac{1}{Z_{AM0}} + \frac{1}{Z_{MF0}} + Y_{AM0} + Y_{MN0} + Y_{MF0} + \frac{1}{Z_{MN0} + \frac{1}{Y_{MN0}}} \right) \right] \left[1 + Z_{MF0} \left(Y_{MF0} + Y_{FB0} + \frac{1}{Z_{FB0} + \frac{1}{Y_{FB0}}} \right) \right] \quad (13)$$

1.2.3 有源多分支配电网

图 7 为考虑线路分支的有源配电网正常运行时 A 相的等效电路, 线路参数与无源多分支配电网相同。其中, \dot{U}_N 、 \dot{I}_N 分别为分布式电源输出的相电压和相电流。

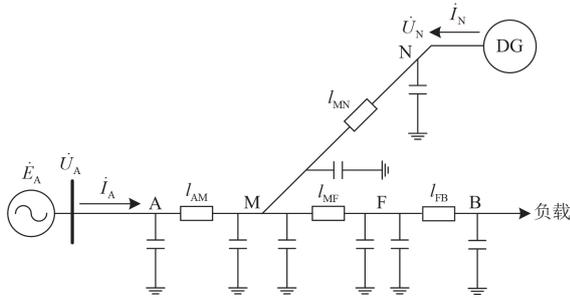


图 7 有源多分支配电网等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of active multi-division distribution network

当系统正常运行时, 根据电路基本定理, 有

$$Y_{MN} = j\omega C_1 \frac{L_{MN}}{2} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{AM} = (\dot{I}_A - \dot{U}_A Y_{AM}) Z_{AM} \\ \dot{U}_M = \dot{U}_A - \dot{U}_{AM} \\ \dot{U}_{MF} = Z_{MF} [\dot{I}_A - \dot{U}_A Y_{AM} + \dot{I}_N - \dot{U}_N Y_{MN} - \dot{U}_M (Y_{AM} + Y_{MN} + Y_{MF})] \end{cases} \quad (15)$$

式中: Y_{MN} 为线路 MN 的正序对地导纳。

故障线路母线至故障点电压降落 \dot{U}_{AF} 及故障点电压 $\dot{U}_{F|0}$ 满足

$$\begin{cases} \dot{U}_{AF} = \dot{U}_{AM} + \dot{U}_{MF} \\ \dot{U}_{F|0} = \dot{U}_A - \dot{U}_{AF} \end{cases} \quad (16)$$

当发生单相接地故障时, 考虑 10 kV 系统中分布式电源主要为通过 Y/Δ 接线的变压器接入的分布式光伏系统^[24-25], 网侧变压器采用角形接线方式, 在故障过程中零序电流无法流通。分布式电源仅在

正常运行时影响线路潮流, 使故障点正常运行时的电压和无源配电网存在差异, 在零序网络中的消弧电压分析方法和无源配电网相同。

为准确计算消弧电压, 除已知线路参数与设备量测获取相关电气量外, 仍须获取故障距离数据。

2 基于 FTU 数据驱动故障点测距方法

考虑到多分支系统电网结构复杂, 分支对故障后电气量特征影响程度较高, 常规方法计算故障距离难度较大, 同时欠缺对分布式电源不同运行工况时电气特征的考虑。FTU 作为一种安装在配电网中能够对电力系统相关参数进行测量的装置, 能够实时获取配电网中电压、电流等电气量数据, 反映配电网的实时运行状态。

为兼顾不同运行工况下故障点测距精确度与计算速度, 同时充分利用现有 FTU 量测数据, 本文采用 CNN-LSTM 数据驱动方式进行故障测距, 通过离线学习训练神经网络模型, 充分挖掘不同故障下故障信息与故障距离的耦合特性, 兼顾测距的精确性与时效性。

2.1 数据驱动建模

2.1.1 卷积神经网络

由于多分支线路的结构复杂程度较高, 各电气量相互耦合, 为充分挖掘数据电气量内在特征, 提高数据驱动测距精度, 采用 CNN 对初始数据特征进行提取处理。CNN 采用卷积运算, 其中卷积层使用复数可学习的卷积核对上层提取的特征进行卷积, 通过激活函数传递至下一层。卷积层表达式为

$$\mathbf{H}_r = \sigma(\mathbf{H}_{r-1} \otimes \mathbf{W}_r^k + \mathbf{B}_r) \quad (17)$$

式中: \mathbf{H}_r 为第 r 层卷积层的特征输出; \mathbf{W}_r^k 为第 r 层卷积层中第 k 个卷积核的权重矩阵; \mathbf{B}_r 为卷积层偏差矩阵; “ \otimes ” 为卷积运算符; σ 为激活函数。

卷积运算具有稀疏交互和参数共享的特性。稀疏交互是指由于 \mathbf{W}_r^k 的维度较低, 为了充分挖掘局部特征, 卷积核在每次运算时仅对输入的局部区域进行数据转换; 参数共享是指为了提取数据中的相似特征, 卷积核在滑动遍历输入的各个局部区域的过程中, 每个区域都共享相同的卷积核权重参数。当多支路配电网发生故障时, 各电气量的分布会呈现出明显的差异。因此, CNN 的上述两种特性有利于挖掘各电气量的内在特征, 进而构建与故障支路故障距离的映射关系。

2.1.2 长短期记忆神经网络

通常工程运用的循环神经网络具有学习时间序列前后时刻关系的能力, 但存在对数据的长程依赖

以及梯度消失问题。基于 RNN 改进的 LSTM 神经网络，通过对新数据的筛选和旧数据的选择遗忘，来改善数据长程依赖和梯度消失问题。LSTM 单元结构如图 8 所示。

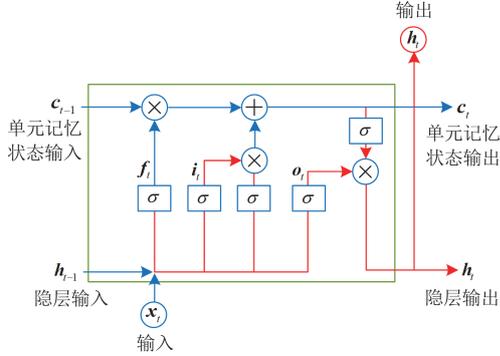


图 8 LSTM 单元结构图

Fig. 8 Diagram of LSTM unit structure

图 8 中： f_t 、 i_t 、 o_t 分别为遗忘门、输入门、输出门。遗忘门 f_t 决定 c_{t-1} 中信息的丢弃或保留；输入门 i_t 决定 c_t 中信息的增加；输出门 o_t 决定隐藏状态 h_t 中的信息。LSTM 单元根据当前输入和前一时刻的输出动态调整记忆和输出，在神经网络迭代更新中不断改变各单元的权重参数，能够在具备对有效信息长期记忆能力的基础上，拟合输入与输出之间的非线性映射关系。

LSTM 单元中各单元门的数据由当前时刻的输入 x_t 与上一时刻输出 h_{t-1} 通过权重、偏置矩阵拟合得到，具体如式(18)所示。

$$\begin{bmatrix} f_t \\ i_t \\ o_t \end{bmatrix} = \sigma \left(\begin{bmatrix} W_{fx} & W_{fh} \\ W_{ix} & W_{ih} \\ W_{ox} & W_{oh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ h_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_f \\ b_i \\ b_o \end{bmatrix} \right) \quad (18)$$

临时单元记忆状态 c_t 的计算如式(19)所示。

$$c_t = f_t c_{t-1} + i_t \sigma(W_{cx} x_t + W_{ch} h_{t-1} + b_c) \quad (19)$$

隐藏状态 h_t 的计算如式(20)所示。

$$h_t = o_t \sigma(c_t) \quad (20)$$

式中： W_{fx} 、 W_{ix} 、 W_{ox} 、 W_{cx} 、 W_{fh} 、 W_{ih} 、 W_{oh} 、 W_{ch} 为不同单元门的权重矩阵； b_f 、 b_i 、 b_o 、 b_c 为不同单元门的偏置矩阵。

2.2 CNN-LSTM 神经网络测距模型

采用 CNN-LSTM 共同构建故障点测距模型，其中，CNN 模型用来提取单相接地故障时母线、分支端口电压、电流幅值和相角数据特征，LSTM 对 CNN 处理数据进行迭代学习，更新权重偏差系数，提高拟合精度。在故障发生时输入量测数据得到故障点距离，具体流程如图 9 所示。

1) 数据初始化

调研配电网各接地故障情况下 FTU 量测数据运行库，提取不同故障情况下各量测特征与故障距离等数据，总结各故障特征数据集。

2) 神经网络训练学习

数据初始化，将数据输入 CNN-LSTM 神经网络进行训练。通过输入层数据预测输出数据，与校验数据进行比较，计算神经网络预测误差。

3) 迭代优化

使用预测拟合值与实际值的均方根误差进行校验，作为网络拟合程度评判指标。迭代更新 LSTM 神经元权重与偏差，重新训练神经网络，直至满足误差要求或达到迭代次数。

4) 输出数据处理

完成训练的神经网络能够反映不同故障特征下故障距离与故障特征的映射关系。在故障发生时调用神经网络，通过 FTU 量测数据得到故障距离，代入式(7)和式(13)计算出消弧电压数据。

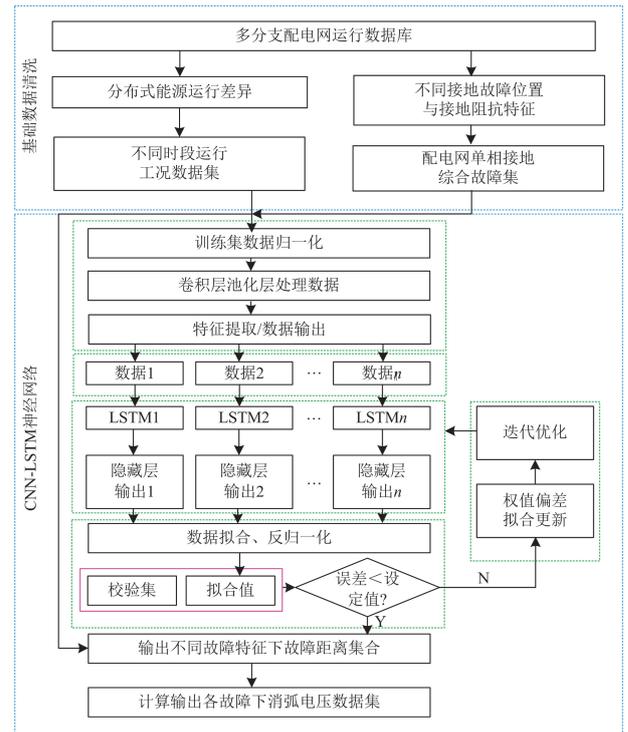


图 9 CNN-LSTM 故障点测距流程框图

Fig. 9 Flow diagram of CNN-LSTM fault point location

3 算例分析

为验证本文所提基于数据驱动的有源电压消弧方法的有效性，算例分析部分采用如图 1 所示的含分布式电源的多分支配电网验证故障点测距精确性以及消弧策略有效性。

3.1 故障点测距方法准确性验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示配电网。样本采集工况设置为分支后端 A 相单相接地短路, 系统运行在额定运行工况, 采集各支路首段相电压和电流数据与当前故障距离数据整理为数据集。在 10 kV 中性点经消弧线圈接地系统中, 工程上常采用过补偿运行方式, 经消弧线圈补偿后的残流不超过 5 A^[18,26], 因此, 本文算例中消弧线圈电感取 750 mH, 有源消弧装置的容量为 30.3 kVA。配电网线路具体参数如表 1 所示。

表 1 基本线路参数

Table 1 Basic line parameters

参数	数值
额定电压/kV	10
正序单位阻抗/(Ω/m)	$1.23 \times 10^{-4} + j7.2 \times 10^{-5}$
正序单位电容/(μF/m)	2.84×10^{-4}
零序单位阻抗/(Ω/m)	$1.23 \times 10^{-4} + j2.88 \times 10^{-4}$
零序单位电容/(μF/m)	2.58×10^{-4}
AM 线路长度/m	3000
MN 分支长度/m	6000
MF 故障距离/m	1~7000
消弧线圈电感/mH	750

针对不同接地阻抗故障情形, 收集各分支 FTU 的量测数据作为故障特征, 构建包含 7000 组样本的数据集, 随机抽取 6000 组样本作为训练集, 剩余 1000 组样本作为测试集, 用以评估故障发生时测距模型故障定位效果, 本部分算例以 4 组典型接地阻抗为例进行分析, 采样数据详细见表 2。

表 2 故障参数遍历表

Table 2 Fault parameters traverse list

	数值	参数数量
故障点 F 距 M 距离/m	1~7000	7000
R_f/Ω	100、500、1500、3000	4

为全面校验数据驱动测距模型的故障距离定位效果, 采用测试集数据作为评估基准, 拟合距离与实际误差为判断依据, CNN-LSTM 神经网络的具体参数配置详见表 3, 不同接地阻抗故障时的测距误差指标如图 10 所示。

表 3 CNN-LSTM 参数

Table 3 CNN-LSTM parameter

CNN		LSTM	
参数	数值	参数	数值
输入特征数量 N_i	14	神经元个数 n	50
卷积核数量 N_c	32	梯度阈值 G	1
池化层数量 N_p	1	初始学习率 L_r	0.029
批处理样本数 N_b	3000	迭代次数 N_E	2000

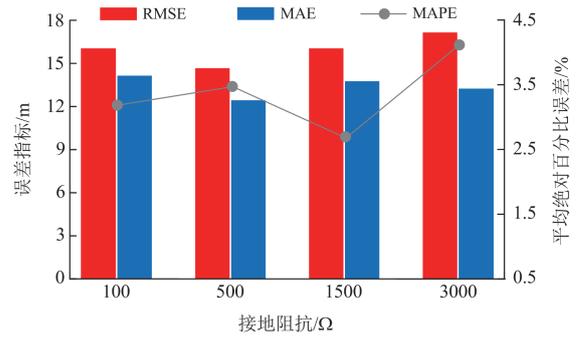


图 10 数据驱动测距误差指标

Fig. 10 Data driven ranging error index

如图 10 所示, 数据驱动拟合得到故障距离均方根误差(root mean square error, RMSE)仅为 16、14、16 与 17 m, 平均绝对误差(mean absolute error, MAE)仅为 14.1、12.4、13.7 与 13.2 m。考虑到实际距离数值大小对平均指标的影响, 加入平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)评判测距精度, 分别为 3.18%、3.5%、2.61%与 4.22%。相比于线路参数, 数据驱动拟合误差距离对消弧电压的计算影响极小。为比较不同故障点的测距效果及误差, 选取典型距离分析, 如表 4 所示。

表 4 中性点经消弧线圈接地配电网简单线路测距结果

Table 4 Location result of simple line in distribution network with neutral point grounding via arc suppression coil

故障点 F 到 M 距离/m	不同 R_f 下的测距结果/m				平均误差距离/m
	100 Ω	500 Ω	1500 Ω	3000 Ω	
1000	1015.6	1008.5	1022.5	1024.5	17.8
2000	1998.0	2010.2	2005.7	2011.7	7.4
3500	3489.5	3493.8	3497.0	3496.2	5.9
5000	4984.8	4985.7	4988.3	4984.9	17.1
7000	6974.8	6970.0	6966.2	6968.4	30.2

由表 4 可知, 在故障距离相同、接地电阻不同的情况下, 靠近线路首端和末端的平均误差距离大, 靠近线路中段的平均误差小, 其中 3500 m 处的平均误差距离最小, 仅为 5.9 m。

由上述分析可知, 该数据驱动测距模型在多支配电网中可以保持较高的准确性, 其中线路末端测距误差距离较大。为验证该测距策略的可行性, 以误差较大的 7000 m 处故障情况为例, 取 $R_f = 100 \Omega$ 、 $R_f = 3000 \Omega$ 两种接地电阻情况进行分析。

3.2 消弧效果有效性验证及对比

为验证本文所提消弧方法的正确性, 本节利用数据驱动拟合故障距离, 考虑分布式电源不同接入情况。设置故障发生时间为 0.1 s, 有源消弧装置投入时刻为 0.2 s, 以高压侧电源相电压为参考向量。

3.2.1 无源多分支配电网

在 $l_{MF} = 7000 \text{ m}$ 的情况下, 正常运行时对电压和电流数据同步采样, 并进行傅里叶变换, 根据式(8)一式(10)可以计算母线至故障点的电压降落 $\dot{U}_{AF} = 333.7 \angle 57.3^\circ \text{ V}$, 故障点 F 在正常运行时电压 $\dot{U}_{F|0} = 8264.45 \angle 28.9^\circ \text{ V}$; 进一步求得母线电压 $\dot{U}_A = 8559.5 \angle 29.98^\circ \text{ V}$, 根据传统有源电压消弧方法的控制目标 $\dot{U}_{in} = -\dot{E}_A$, 可计算得出消弧电压 $\dot{U}_{in} = 8559.5 \angle -150.02^\circ \text{ V}$; 考虑线路电压降落时, 将实际故障距离 $l_{MF} = 7000 \text{ m}$ 代入式(11)一式(13), 可计算得出消弧电压 $\dot{U}_{in} = 8251.45 \angle -150.7^\circ \text{ V}$ 。同理, 利用本文提出的数据驱动测距方法, 利用获取的故障距离分别计算所需注入的消弧电压 \dot{U}_{in} 大小, 如表 5 所示。

表 5 无源配电网故障注入消弧电压

Table 5 Fault injection arc extinction voltage in passive distribution network

计算方法	不同接地电阻下的消弧电压/V	
	100 Ω	3000 Ω
传统方法	$8559.5 \angle -150.02^\circ$	$8559.5 \angle -150.02^\circ$
本文方法	$8252.05 \angle -150.7^\circ$	$8252.2 \angle -150.7^\circ$

由表 5 可知, 本文提出的数据驱动测距的误差对消弧电压的计算结果基本没有影响, 电压的幅值偏差仅为 0.6 V 与 0.75 V, 相角偏差为 0° 。将传统有源电压消弧方法与本文提出的方法进行对比, 结果如表 6 和图 11 所示。

由表 6 可知, 由于线路存在电压降落, 传统的有源电压消弧方法并不能控制故障点电压为 0, 本文

表 6 无源配电网不同消弧策略消弧效果对比

Table 6 Comparison of arc extinction effect of different arc extinction strategies in passive distribution network

R_f/Ω	残压幅值/V		残流幅值/A	
	传统方法	本文方法	传统方法	本文方法
100	309.4	0.81	3.094	0.0081
3000	309.4	0.92	0.103	0.0003

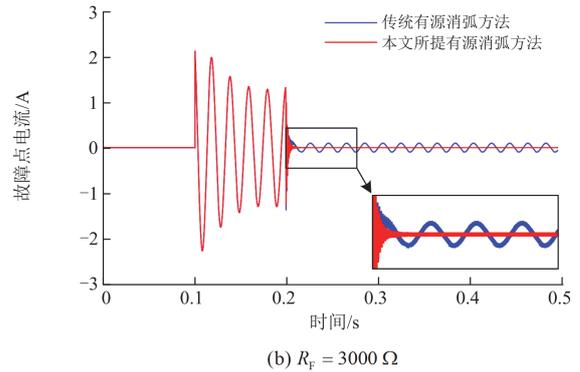
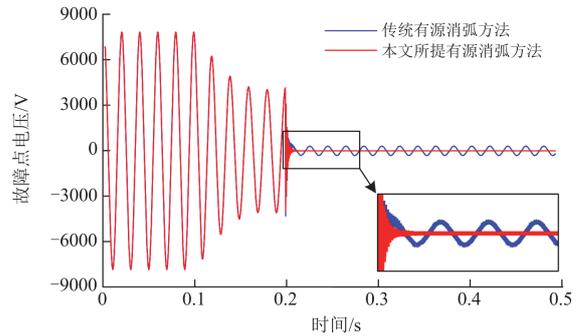
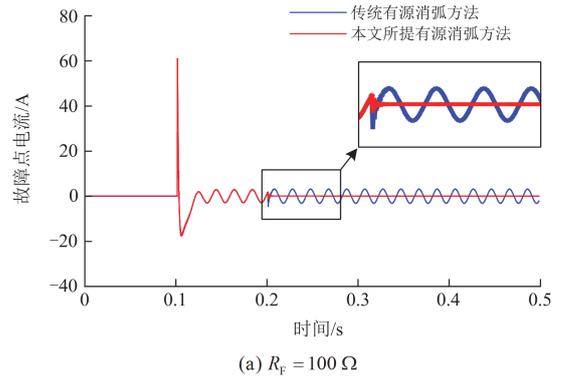
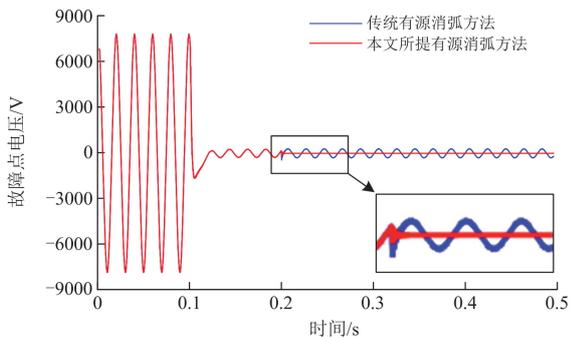


图 11 无源配电网不同策略消弧效果对比

Fig. 11 Comparison of arc elimination effect of different strategies in passive distribution network

提出的有源电压消弧方法在无源多分支配电网中可以较好地补偿线路阻抗产生的电压降落, 使故障点电压和电流接近 0, 抑制电弧的重燃。

3.2.2 有源多分支配电网

在 $l_{MF} = 7000 \text{ m}$ 的情况下, 考虑分布式电源接入的影响, 对本文所提方法进行校验, 正常运行时对电压电流数据同步采样, 可计算母线至故障点的电压降落 $\dot{U}_{AF} = 234.47 \angle 67.75^\circ \text{ V}$, 发生单相接地故障时, 得到母线电压 $\dot{U}_A = 8568.7 \angle 29.97^\circ \text{ V}$ 。同理, 传统有源电压消弧方法的控制目标为 $\dot{U}_{in} = -\dot{E}_A$, 可得 $\dot{U}_{in} = 8568.7 \angle -150.03^\circ \text{ V}$; 考虑线路电压降落

时, 可计算故障点 F 在正常运行时的电压 $\dot{U}_{F0} = 8382.31\angle 28.97^\circ \text{ V}$, 注入消弧电压 $\dot{U}_{in} = 8369.1\angle -150.64^\circ \text{ V}$; 同样地, 利用本文提出的数据驱动得到的测量距离分别计算消弧电压 \dot{U}_{in} 大小, 计算结果如表 7 所示。

表 7 有源配电网故障注入消弧电压
Table 7 Fault injection arc extinction voltage in active distribution network

方法	不同接地电阻下的消弧电压/V	
	100 Ω	3000 Ω
传统方法	8568.7∠-150.03°	8568.7∠-150.03°
本文方法	8369.8∠-150.64°	8369.9∠-150.64°

由表 7 可知, 本文提出的数据驱动测距的误差对消弧电压的计算结果影响较小, 幅值偏差仅有 0.7 V 与 0.8 V, 相角偏差为 0°。将传统有源电压消弧方法与本文方法进行对比, 结果如表 8 和图 12 所示。

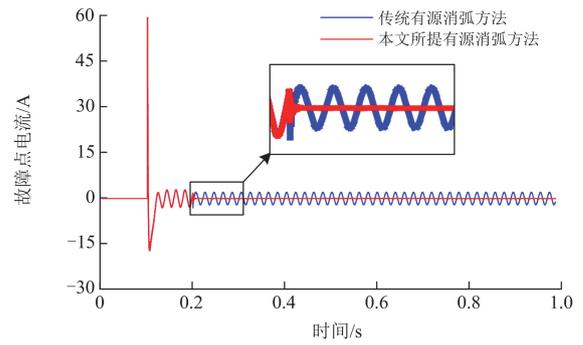
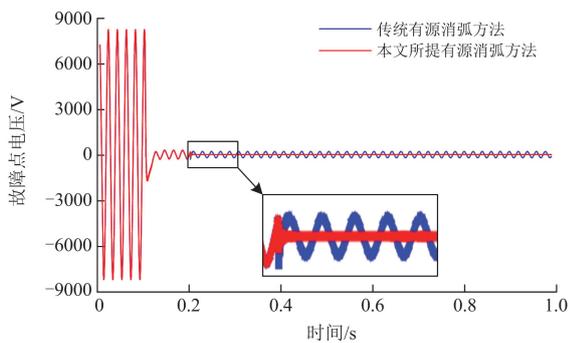
由表 8 可知, 由于线路阻抗上存在电压降落, 传统的有源电压消弧方法并不能控制故障点电压为 0, 故障点电压幅值约为故障点正常运行时线路阻抗上电压降落幅值, 本文提出的有源电压消弧方法在分布式能源接入的有源配电网中也可以较好补偿线路阻抗产生的电压降落, 使故障点电压、电流接近 0。

算例结果进一步验证了本文所提有源消弧电压计算方式与故障测距模型的有效性与泛用性, 在面对多分支线路与分布式电源接入的复杂配电网故障下仍具有较好的消弧效果。在实际工程应用时, 配电线路可容许存在 ±5% 的电压偏差, 因此有源消

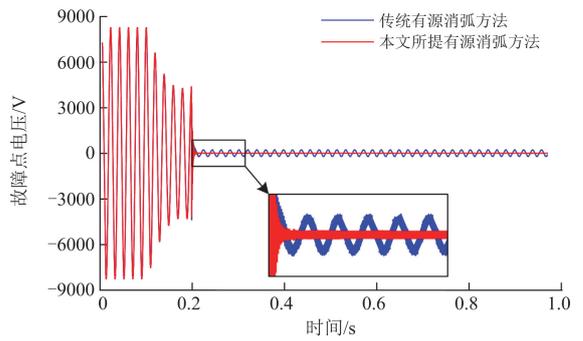
表 8 有源配电网不同消弧策略消弧效果对比

Table 8 Comparison of arc extinction effect of different arc extinction strategies in active distribution network

R_f/Ω	残压幅值/V		残流幅值/A	
	传统方法	本文方法	传统方法	本文方法
100	208.5	10.3	2.085	0.103
3000	208.5	1.67	0.07	0.0006



(a) $R_f = 100 \Omega$



(b) $R_f = 3000 \Omega$

图 12 有源配电网不同策略消弧效果对比

Fig. 12 Comparison of arc elimination effect of different strategies in active distribution network

弧装置注入的消弧电压调整范围为 0.95~1.05 倍网络额定电压。

4 结论

传统的有源电压消弧技术在应对分布式能源接入的多分支线路场景并考虑线路电压降落时, 其消弧能力明显不足, 本文提出一种基于数据驱动的配电网有源电压消弧技术, 主要结论如下。

1) 考虑线路电压降落的影响, 对分布式电源接入的多分支线路消弧原理进行分析, 推导消弧电压的计算方法。结果表明, 基于该方法得到的消弧电

压,能够有效抑制故障电压为 0,适用于多分支复杂电力系统的消弧应用。

2) 基于 FTU 量测数据,提出一种基于数据驱动的测距方法。该方法通过构建 CNN-LSTM 测距模型,在故障发生时能够精确拟合出故障距离。该模型在不同运行故障场景下测距误差均在 4.22%以下,能够满足多类型故障下复杂配电网的测距精度与适用性要求。

参考文献

- [1] 吴江雄, 郑茂然, 王欣, 等. 基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 58-66.
WU Jiangxiong, ZHENG Maoran, WANG Xin, et al. Single-phase grounding fault line selection method for resonant grounding system based on transient zero-sequence admittance value[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 58-66.
- [2] 杨鹏辉, 钱国超, 白浩, 等. 参数不对称配电网高阻接地故障感知与辨识方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 22-32.
YANG Penghui, QIAN Guochao, BAI Hao, et al. High resistance grounding fault perception and identification method in asymmetric distribution network[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 22-32.
- [3] 常新建, 邵文权, 程远, 等. 基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 161-169.
CHANG Xinjian, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 161-169.
- [4] 李冠华, 徐凯, 栗罡, 等. 66 kV 系统消弧线圈分散式补偿策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 103-112.
LI Guanhua, XU Kai, LI Gang, et al. Research on distributed compensation strategy of arc suppression coil of 66 kV system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 103-112.
- [5] 谢大为, 王京景, 朱争高, 等. 谐振接地系统对地电容与消弧线圈电感统一测量方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(18): 23-28.
XIE Dawei, WANG Jingjing, ZHU Zhenggao, et al. Unified measurement method for ground capacitance and arc suppression coil inductance of resonant grounding system[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(18): 23-28.
- [6] WANG Zhan, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. An active voltage-type grounding fault protection method for medium-voltage distribution networks with neutral point voltage flexible regulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 1538-1548.
- [7] LUAN Xiaoming, LI Xiaopeng, WU shouyuan, et al. Arc suppression control with adaptive parameters of active grounding device considering ground fault resistance uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 426-435.
- [8] 周江华, 万山明, 张勇. 基于参数闭环控制的配电网柔性接地消弧方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1189-1197.
ZHOU Jianghua, WAN Shanming, ZHANG Yong. Flexible-grounding arc-suppression method for distribution network based on parameter closed-loop control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1189-1197.
- [9] 赵国军, 陈坤焱, 李沁, 等. 电流型有源消弧法性能分析与改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(1): 136-142.
ZHAO Guojun, CHEN Kunyi, LI Qin, et al. Performance analysis and improvement of current active arc-suppression method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1): 136-142.
- [10] LIU Baowen, WANG Chenyu, ZENG Xiangjun, et al. Single line-to-ground fault protection method considering three phase-to-ground parameters asymmetry in active flexible grounding systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2207-2218.
- [11] 张炜祺, 王连辉, 薛永端, 等. 基于柔性调控零序电压的不平衡配电网故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 159-169.
ZHANG Weiqi, WANG Lianhui, XUE Yongduan, et al. Fault detection method for unbalanced distribution networks based on flexible regulation of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 159-169.
- [12] HOU Yuchao, GUO Qi, TU Chunming, et al. Adaptive active voltage-type arc suppression strategy considering the influence of line parameters in active distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4799-4808.
- [13] 郭谋发, 游建章, 林先辉, 等. 适应线路参数及负载变化的配电网柔性优化消弧方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 138-145.
GUO Moufa, YOU Jianzhang, LIN Xianhui, et al. Flexible arc suppression optimization method for distribution network adaptable to variation of line parameters and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,

- 41(8): 138-145.
- [14] TANG Minan, LU Hang, LI Bin. Fault location of untransposed double-circuit transmission lines based on an improved Karrenbauer matrix and QPSO algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 738-751.
- [15] 马晓锋, 安军, 高志强, 等. 基于 CEEMDAN 和 TEO 的配电网行波故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 87-95.
MA Xiaofeng, AN Jun, GAO Zhiqiang, et al. A traveling-wave fault location method based on CEEMDAN and NTEO for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 87-95.
- [16] 陶政臣, 高湛军, 见文号. 基于投入并联小电阻的含多支配电网单相接地故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 38-48.
TAO Zhengchen, GAO Zhanjun, JIAN Wenhao. Traveling wave fault location method for a single-phase ground fault of a distribution network with multiple branches based on input parallel small resistance[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 38-48.
- [17] 夏翊翔, 李泽文, 雷柳, 等. 基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4868-4878.
XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4868-4878.
- [18] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [19] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [20] 邹祁武, 胡金磊, 孙云莲, 等. 一种基于故障指示器的行波一阻抗法双端带支路配电网故障定位方法, 中国: CN108627741B[P]. 2020-06-16.
- [21] 张大波, 李雪婷, 陶维青. 基于边缘计算和深度学习的有限信息配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 22-32.
ZHANG Dabo, LI Xueting, TAO Weiqing. Single-phase ground fault section location in distribution networks with limited information based on edge computing and deep learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 22-32.
- [22] 张黎, 郝东新, 邹亮, 等. 用于分布式发电接入的交直流叠加配电网结构分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 157-163.
ZHANG Li, HAO Dongxin, ZOU Liang, et al. Analysis on structure of AC-DC distribution network used for distributed generation connection[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 157-163.
- [23] 黄昆, 杨新春, 罗杨, 等. 一起 Z 型变压器中性点电压异常升高的故障分析[J]. 变压器, 2017, 54(6): 61-63.
HUANG Kun, YANG Xinchun, LUO Yang, et al. Fault analysis of abnormal neutral point voltage of Z-type transformer[J]. Transformer, 2017, 54(6): 61-63.
- [24] 李政洋, 曹一家, 陈春, 等. 含直配式新能源的配电网接地故障协同处理与区域辨识[J]. 中国电机工程学报: 1-13[2025-02-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240518.2053.006.html>
LI Zhengyang, CAO Yijia, CHEN Chun, et al. Collaborative fault handling and area identification of grounding faults in distribution networks with directly-coupled renewable energy sources[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2025-02-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240518.2053.006.html>
- [25] 杨理斌, 喻锴, 曾祥君, 等. 基于注入电流调控的含分布式电源配电网消弧与选线方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 113-120.
YANG Libin, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Arc suppression and line selection method for distribution network with distributed generation based on injection current regulation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(5): 113-120.
- [26] 杨以涵, 齐郑. 中压配电网单相接地故障选线及定位技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

收稿日期: 2024-11-27; 修回日期: 2025-02-20

作者简介:

齐 郑(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: qizheng319@126.com

张淇钰(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 597027906@qq.com

兰冠仪(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与驱动技术. E-mail: languanyi2023zd@163.com

(编辑 张 颖)