

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.246176

# 基于线路多点电压信息的直流配电系统故障测距及保护方法

李洁<sup>1</sup>, 李亚飞<sup>1</sup>, 钱科军<sup>1</sup>, 徐煦<sup>1</sup>, 余修勇<sup>2</sup>, 张新松<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215000; 2. 南通大学电气与自动化学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 直流暂态故障信号不存在基频分量, 再加上线路参数存在明显的依频特性, 基于 R-L 型或 II 型线路模型的故障测距方法难以实现准确的直流配电线路故障测距。利用线路两端以及线路上另外两个测量点的电压信号, 根据电压在线路非故障部分沿线均匀分布的特点, 提出了用于直流配电系统的故障精确测距方法, 并设计了测距式后备保护方案。所提方法采用最小二乘法求解超定方程组, 提高故障测距精确度和可靠性。利用 PSCAD/EMTDC 中线路的相域依频模型搭建三端直流配电仿真系统, 验证了所提故障测距方法在不同故障位置、过渡电阻、噪声环境和电压信号位置下的有效性和鲁棒性。

**关键词:** 直流配电系统; 依频特性; 故障测距; 最小二乘法; 后备保护

## Fault location and protection method for DC distribution networks based on multi-point voltage measurements

LI Jie<sup>1</sup>, LI Yafei<sup>1</sup>, QIAN Kejun<sup>1</sup>, XU Xu<sup>1</sup>, YU Xiuyong<sup>2</sup>, ZHANG Xinsong<sup>2</sup>

(1. Suzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Since DC transient fault signals lack a fundamental frequency component and line parameters exhibit significant frequency-dependent characteristics, the R-L or II type line-model based methods struggle to achieve accurate fault location in DC distribution lines. Leveraging the characteristic that voltage is evenly distributed along the healthy line, this paper proposes an accurate fault location method for DC distribution systems by utilizing voltage signals from both ends of the line and two additional measurement points along the line. A distance backup protection scheme based on this fault location method is also designed. The proposed approach applies a least squares algorithm to solve an overdetermined system of equations, thus enhancing the accuracy and reliability of fault location. A three-terminal DC distribution simulation model is built in PSCAD/EMTDC using a frequency-dependent phase-domain line model, and the effectiveness and robustness of the proposed fault location method are verified under different fault positions, fault resistances, noise environments, and positions of the voltage signal.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJSSZ00KJJS2312002).

**Key words:** DC distribution systems; frequency-dependent characteristics; fault location; least squares method; backup protection

## 0 引言

与传统交流配电系统相比, 直流配电系统具备传输容量高、供电半径大、电能质量好与线路损耗小等优点, 且更适合接纳分布式光伏, 是新型配电系统的重要组成部分之一<sup>[1-4]</sup>。近年来, 随着分布式

光伏、直流负荷与储能等的不断涌现, 直流配电的吸引力在不断提高<sup>[5-6]</sup>。由于存在电容、电感等储能元件, 直流配电线路故障后放电电流迅速增大, 保护系统必须快速切除故障, 然后, 用于故障测距的时间窗口有限, 显著增大了故障测距难度<sup>[7-8]</sup>。此外, 直流配电线路多为埋地电缆, 人工巡线耗时耗力且难以发现故障点。

作为常用的故障测距方法, 行波测距法在高压直流输电系统中得到成功应用<sup>[9-10]</sup>。然而, 直流配

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目资助 (SGJSSZ00KJJS 2312002)

电线路距离较短，行波测距法需要较高的采样频率才能保证足够的测距精度<sup>[11]</sup>。线路发生高阻接地故障时，故障信号幅值微弱，行波难以检测和识别，测距难度更大。此外，直流配电网拓扑一般较为复杂，行波存在多次折、反射，进一步增加了行波测距难度。

利用故障暂态信息测距是直流配电网故障测距的常用方法之一。文献[12]在直流线路双极短路后，分别取 2 个不同时刻的测量值得到 2 个独立方程，联立求解故障回路参数进行测距，但该方法不适用于单极接地故障。文献[13-17]将直流线路等效为 R-L 模型，分别通过暂态电压比和时域迭代法<sup>[13]</sup>、电流微分初始值法<sup>[14]</sup>、直接时间反转法<sup>[15]</sup>、故障释放能量法<sup>[16]</sup>和多端时域模型法<sup>[17]</sup>等建立故障回路等值模型，并通过求取等值模型参数实现故障测距。文献[18-20]则利用故障后一系列测量数据，通过求解伪逆矩阵得到保护测量点与故障点间的电抗，从而获得故障距离，但难以应用于复杂多源直流配电系统。文献[21]提出基于固定间距两点电压测量的故障测距方法，并利用一次迭代提高大过渡电阻故障情况下的测距精度。

注入信号法是一种常用的直流配电网故障测距方法。文献[22-24]在直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)切除故障线路后，利用探针功率元件(probe power unit, PPU)注入信号进行故障测距，其本质是通过投入带初始电压的电容器组，使得故障回路形成二阶振荡回路，并通过 FFT、Prony 等算法提取衰减振荡信息，从而实现故障测距。注入信号法在 DCCB 切除故障后进行离线测距，无法快速实现故障测距。此外，这些方法需要专门的测距器件，成本较高，且振荡参数提取易受噪声干扰。为避免额外增加有源器件导致故障测距成本上升，文献[25-27]通过直流系统原有的可控器件注入电流，分别通过控制 T 有源断路器、有源换流器、混合模块化多电平换流器等产生特定的注入信号进行故障测距，但需要换流器、断路器等系统器件参与，增加了控制复杂性，也容易扩大故障影响区域。

无论是故障暂态信息法还是注入信号法，均需将直流线路等效为 R-L 型或  $\Pi$  型等效模型，通过求解故障回路的等效参数实现故障测距。然而，直流暂态信号中存在多种频率分量，线路参数存在明显的依频特性，从而导致上述线路等效模型在实际应用中存在明显误差。为解决参数依频特性对故障测距的影响，本文基于直流线路上 4 个测量点的电压信号，根据电压在线路非故障区域沿线均匀分布的特点，提出了直流配电网系统精确故障测距方法，采用最小二乘法求解超定方程组，提高故障测距精确

度和可靠性，并设计了测距式后备保护方案。利用 PSCAD/EMTDC 中线路的相域依频模型搭建三端直流配电仿真系统，验证了所提故障测距方法及测距式后备保护的性能。

### 1 直流线路参数的依频特性

集肤效应导致线路参数随频率变化，且线路参数存在分布特性。线路的集中式等效模型，例如  $\Pi$  型等效模型、R-L 等效模型等无法完全等效线路参数的分布特性和依频特性，精确度不高。在线路的分布式等效模型中，Bergeron 模型也只能计算单个频率下的线路参数。目前，PSCAD/EMTDC 中的线路相域依频模型(frequency dependent phase model, FDPM)精度最高，其通过两个传递函数矩阵来表示信号传输系统的完全频率相关，即特征导纳  $Y_C$  与传播函数  $H$ <sup>[28]</sup>。

$$Y_C = Z^{-1} \cdot \sqrt{Z \cdot Y} \tag{1}$$

$$H = e^{-\sqrt{Y \cdot Z} \cdot l} \tag{2}$$

式中： $Z$ 、 $Y$  分别表示线路单位长度的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵； $l$  表示线路长度。

在电磁暂态计算中，通过线路常量程序(line constants program, LCP)在频域离散点处多次计算  $Y_C$  和  $H$ ，再通过曲线拟合，由等效的低阶有理函数逼近和代替。

典型的 10 kV 直流电缆结构如图 1 所示，具体参数如表 1 所示。本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的电缆线路模型，通过 LCP 求解，获得该电缆不同频率下的传递函数幅值  $|H|$ ，单位串联电阻  $R_0$  和单位串联电感  $L_0$ 。  $|H|$ 、 $R_0$  和  $L_0$  随频率变化趋势如图 2 所示。

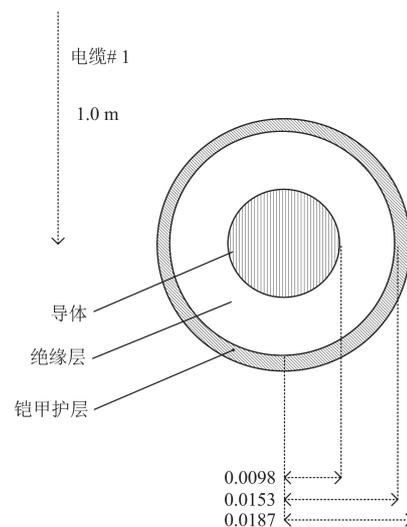


图 1 10 kV 电缆结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the 10 kV cable

表 1 电缆参数

Table 1 Parameters of the cable

层	材料	外半径/mm	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	介电常数
导体	铝	9.8	$2.83 \times 10^{-8}$	1
绝缘层	交联聚乙烯	15.3		4.1
铠甲护层	铅	18.7	$2.2 \times 10^{-7}$	1

图 2(a)给出不同频率下的传递函数幅值 $|H|$ ,可以看出,频率越高,幅值 $|H|$ 衰减越明显;图 2(b)给出不同频率下的线路单位电阻 $R_u$ ,可以看出, $R_u$ 随频率增大而增大,但趋势趋于平缓,当频率从 0 Hz 增加到 1000 Hz 时,线路的参数依频特性最为明显, $R_u$ 从  $0.1 \Omega/km$  上升到  $0.8 \Omega/km$ ;图 2(c)给出不同频率下的线路单位电抗 $L_u$ ,可以看出, $L_u$ 随频率的增大而减小,频率小于 100 Hz 时,下降趋势最为明显,当频率从 0 Hz 增至 100 Hz 时, $L_u$ 从  $3.4 \text{ mH/km}$  下降到  $0.49 \text{ mH/km}$ 。

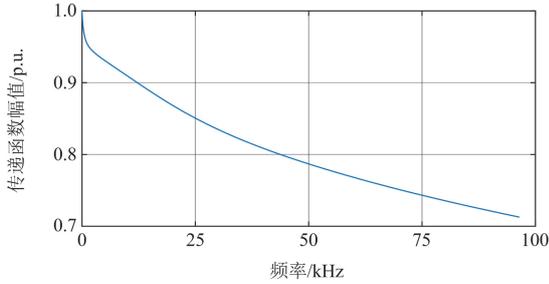
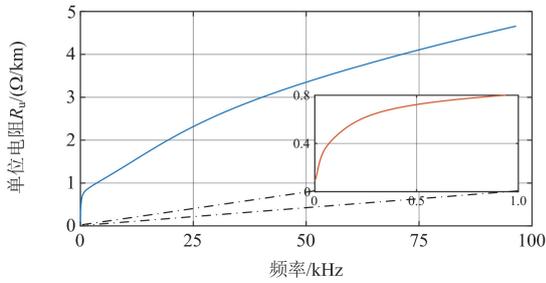
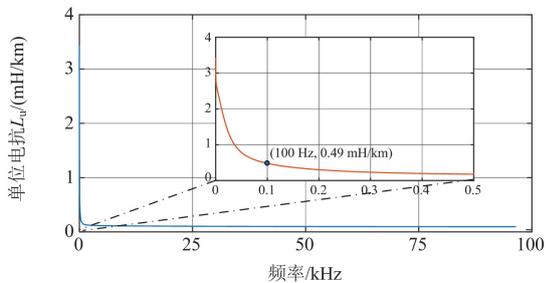
(a)  $|H|$ 随频率变化趋势(b)  $R_u$ 随频率变化趋势(c)  $L_u$ 随频率变化趋势

图 2 电缆参数的依频特性

Fig. 2 Frequency-dependent characteristics of cable parameters

直流故障暂态信号中不存在基频分量,但含有各种频率的分量,因此,直流线路故障测距中必须考虑参数的依频特性。现有直流配电线路故障测距算法大多直接将线路等效为集中参数模型,即 R-L 或  $\Pi$  型等效模型。由于忽略了线路参数的依频特性,在实际应用中难以获得精确的故障测距结果。

## 2 故障测距及保护方法

### 2.1 故障测距原理

为消除参数依频特性对直流线路故障测距的影响,获得更为精确的测距结果,本文提出了如图 3 所示的在线故障测距原理。图 3 中: a、b 分别是直流配电线路的两个端点; $u_a$ 和 $u_b$ 分别为这两点的对地电压(或是极对地电压)。在距离 a 端点 $d_1$ 处的 $a_1$ 点和距离 b 端点 $d_2$ 处的 $b_1$ 点新增两个电压测量点,电压分别为 $u_{a1}$ 和 $u_{b1}$ ,新增测量点的测量系统与系统原有电压测量系统类似,可以在新建直流配电线路时预留测量点。由于本文研究对象为中、低压直流配电系统,测量系统相较于高压系统制造相对容易,成本也较低。直流线路全长为 $l$ ,若在距离 a 端点 $x$ 处发生接地故障,过渡电阻为 $R_f$ , $u_f$ 为故障点处的电压。根据线路电压在 $x$ 和 $l-x$ 无故障区间分别沿线均匀分布的特点,可得:

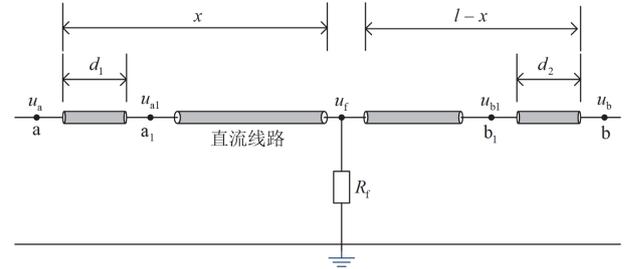


图 3 故障测距原理

Fig. 3 Principle diagram of fault distance measurement

$$\frac{u_a - u_{a1}}{d_1} = \frac{u_a - u_f}{x} \quad (3)$$

$$\frac{u_b - u_{b1}}{d_2} = \frac{u_b - u_f}{l - x} \quad (4)$$

联立式(3)和式(4),得到故障距离 $x$ ,如式(5)所示。

$$x = \frac{(u_a - u_b) \cdot d_1 \cdot d_2 + (u_a - u_b) \cdot l \cdot d_1}{(u_a - u_{a1}) \cdot d_2 + (u_b - u_{b1}) \cdot d_1} \quad (5)$$

式(5)消除了过渡电阻对故障测距的影响,且不依赖直流线路等值参数信息,只利用了线路电压沿线非故障部分均匀分布的特点。线路两端通过北斗、GPS 等时间同步系统进行同步定时,只需将电

压信号及对应的测量时刻发送到线路另外一段, 即可通过式(5)求得故障距离。

式(5)中, 当  $d_1$ 、 $d_2$  较小时, 测量点间的电压差值很小, 分母可能接近于零, 容易导致测距误差。当以  $d_1$ 、 $d_2$  为变量时, 各测量点上电压的测量误差相对固定, 测量误差与传感器型号有关, 将各测量点的误差代入式(5), 整理可得

$$\hat{x} = \frac{(u_a - u_b) \pm (\varepsilon_a + \varepsilon_b) + \frac{(u_b - u_f)l}{l-x} \pm \frac{(\varepsilon_b + \varepsilon_{b1})l}{d_2}}{\frac{(u_a - u_f)}{x} \pm \frac{(\varepsilon_a + \varepsilon_{a1})}{d_1} + \frac{(u_b - u_f)}{l-x} \pm \frac{(\varepsilon_b + \varepsilon_{b1})}{d_2}} \quad (6)$$

式中:  $\hat{x}$  为误差表示的故障距离;  $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_{a1}$ 、 $\varepsilon_b$  和  $\varepsilon_{b1}$  分别为 a、 $a_1$ 、b 和  $b_1$  对应的测量误差。

通过式(6)可以看出, 测量误差对计算精度的影响随  $d_1$ 、 $d_2$  的增大而减小, 因此, 在一定的测量误差下,  $d_1$ 、 $d_2$  的值不宜过小。此外, 各测量点电压信号幅值变化越大, 误差的相对值越小。

故障后任意时刻测量得到的电压均满足式(5), 若采样得到  $n$  个数据点, 则可获得由  $n$  个方程构成的超定方程组。为了便于表述, 令:

$$B(i) = (u_a - u_b)d_1d_2 + (u_b - u_{b1})ld_1 \quad (7)$$

$$A(i) = (u_a - u_{a1})d_2 + (u_b - u_{b1})d_1 \quad (8)$$

式中:  $B(i)$  和  $A(i)$  为两个中间变量,  $i \in [1, n]$ 。

此时, 由  $n$  个方程构成的超定方程矩阵  $A$ 、 $B$  可写成如式(9)所示形式。

$$B = A\bar{x} \quad (9)$$

利用最小二乘法求解式(9), 得到故障距离  $\bar{x}$  为

$$\bar{x} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (10)$$

根据上述推导, 当故障发生在  $a_1$  和  $b_1$  之间时, 利用两端的 4 个电压信号, 便能够得到故障距离。从以上分析可看出: 本文提出的方法仅利用线路电压在非故障区域沿线均匀分布这一特点实现故障测距, 而无需考虑故障回路等效参数, 因此, 线路参数依频特性对本文所提方法几乎没有影响。

对于双极短路故障, 只要将上述 4 个位置的对地电压改为极间电压, 其余部分不变, 也能够得到故障距离。当故障发生在端点 a 与测量点  $a_1$  之间或端点 b 与测量点  $b_1$  之间时, 无法通过式(10)实现故障测距。此外, 对区外故障(即母线 a、b 或其他区外线路), 本文提出的方法也不能给出正确的故障位置。

### 2.2 测距式后备保护方案

为解决上述问题, 本文提出了用于判别故障区域的测距式后备保护方案, 根据电压在非故障区域沿线均匀分布的特点, 判断故障发生区间。以图 3 中 a 端点配置的保护为例, 可判断故障是否发生在

区内, 若故障发生在区内, 可进一步判断故障是否发生在  $a_1$  点左侧。根据电压沿线均匀分布可列出

$$k_1 = \frac{(u_b - u_{a1})/(l - d_1)}{(u_{b1} - u_{a1})/(l - d_1 - d_2)} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{(u_b - u_{a1})/(l - d_1)}{(u_b - u_a)/l} \quad (12)$$

式中:  $k_1$  和  $k_2$  分别为判断故障区域定义的两个比值参数。

当故障发生在区外, 即在端点 a 侧直流母线或与该母线相邻的其他线路, 或在端点 b 侧直流母线或与该母线相邻的其他线路时, 参数  $k_1$ 、 $k_2$  均在 1 附近(也包括无故障发生情况)。当故障发生在区内且故障点位于  $a_1$  点左侧时, 仅参数  $k_1$  在 1 附近, 此时, 由于端点 a 和端点 b 间存在故障点, 电压沿线分布的均匀特性被破坏, 参数  $k_2$  与 1 相差较大; 当故障发生在区内且位于  $a_1$  点右侧时, 参数  $k_1$ 、 $k_2$  均与 1 相差较大。从以上描述可看出, 通过判断参数  $k_1$  和  $k_2$  是否在 1 附近便可判断故障区域, 详细判别流程如图 4 所示。

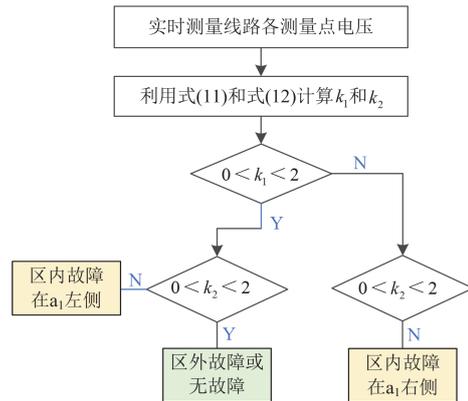


图 4 故障区判别流程

Fig. 4 Flowchart of determining fault area

在工程实践中, 当参数  $k_1$ 、 $k_2$  的计算结果落在区间(0, 2)内时, 便可认为其在 1 附近。上述保护也可以作为单端量主保护之外的一种测距式后备保护, 提高了保护可靠性。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型概述

本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了三端±10 kV 直流配电系统仿真模型, 由 3 个两电平电压源换流器(voltage source converter, VSC)和 2 条直流配电线路组成, 系统拓扑与线路长度如图 5 所示, 其他参数如表 2 所示。各电缆线路采用相域依频模型, 电

缆层结构、参数等详见图 1 和表 1。换流器中性点采用钳位电容经小电阻接地。VSC1 采用定直流电压控制, 控制直流电压为 $\pm 10$  kV, VSC2 和 VSC3 采用定有功功率控制, 输入/输出有功功率分别定为

5 MW 与 8 MW。仿真中, 模拟直流线路 ab 某位置发生接地故障后, 分别测量 a、 $a_1$ 、b 和  $b_1$  处的电压信号, 采样频率为 10 kHz。测量点  $a_1$ 、 $b_1$  距直流线路端点 a、b 的距离分别为  $d_1$  和  $d_2$ 。

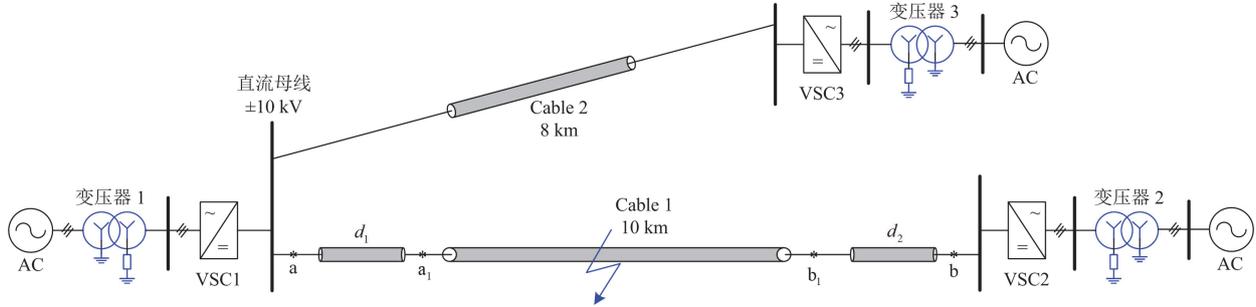


图 5 仿真模型拓扑结构

Fig. 5 Topology of simulation model

表 2 仿真模型参数

Table 2 Parameters of simulation model

仿真参数	数值	仿真系统	方式
直流电压/kV	$\pm 10$	换流器结构	两电平 VSC
交流线电压/kV	10	VSC1	定直流电压控制
交流电抗器/mH	10	VSC2	输入功率 5 MW
直流电容/ $\mu$ F	20 000	VSC3	输出功率 8 MW

模拟在距离 a 端 3 km 处发生单极接地故障, 过渡电阻为  $2 \Omega$ , 此时, 测量点 a、 $a_1$  与 b、 $b_1$  处的电压分别如图 6(a)与图 6(b)所示。在实际工程中, 总会存在各种噪声干扰, 为获得更贴近工程实际的电压信号, 分别在图 6(a)与图 6(b)中叠加信噪比(signal noise ratio, SNR)为 40 dB 的高斯白噪声, 分别如图

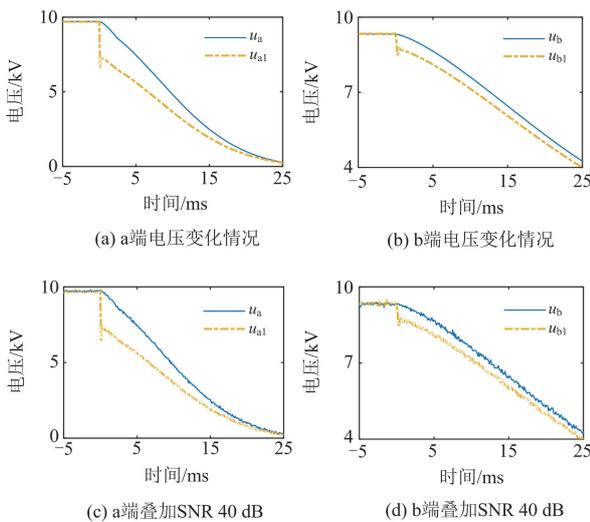


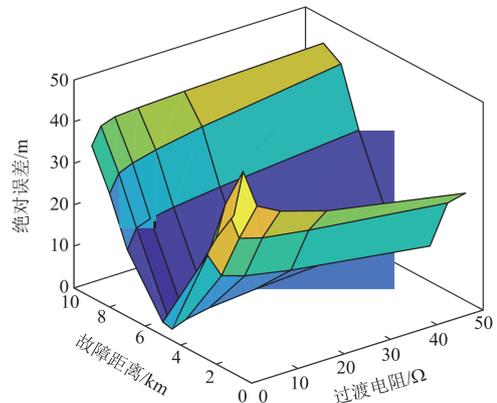
图 6 各测量点电压

Fig. 6 Voltages at different measurement points

6(c)与图 6(d)所示。基于图 6(c)与图 6(d)给出的电压信号, 采用本文给出的方法进行故障测距。

### 3.2 故障测距结果

为检验本文所提故障测距方法的性能, 仿真模拟在线路 ab 不同位置, 发生不同过渡电阻的单极接地故障, 并利用本文所提方法进行故障测距, 测距误差如图 7 所示。为分析电压测量点位置对测距误差的影响, 图 7 分别给出了参数  $d_1$ 、 $d_2$  不同取值下的绝对测距误差。从上文介绍的测距原理可知, 若故障发生在直流线路端点与故障测量点之间, 则只能定位故障区域, 但无法实现故障测距。也就是说, 参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值过大将导致本文所提方法失去工程应用价值, 因此, 参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值超过 500 m 情况下的测距误差并未在图 7 中给出。仿真中, 用于故障测距的数据点数目  $n$  的取值为 20, 对应的采样时长为 2 ms, 直流断路器动作时长一般大于 2 ms, 因此, 可获取故障测距所需的电压数据。

(a)  $d_1$ 和 $d_2$ 为200 m

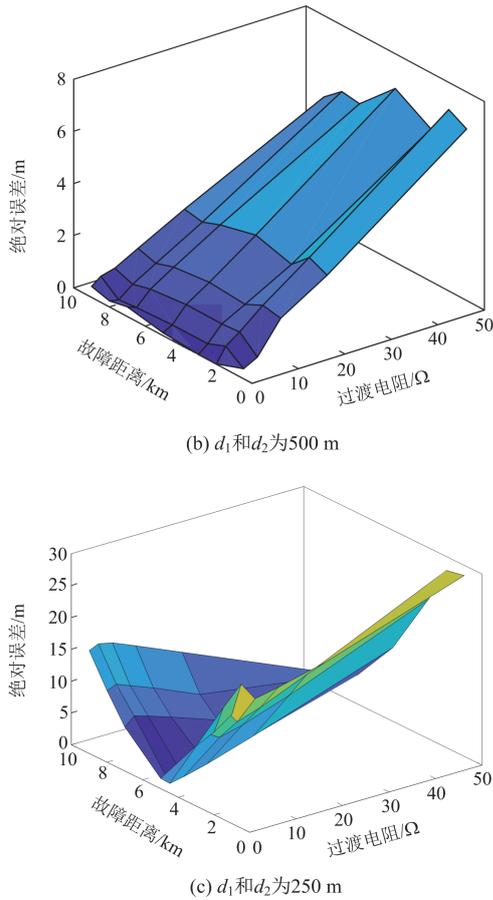


图 7 无噪声下故障测距误差

Fig. 7 Fault location errors without noises

从图 7(a)可看出：参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为 200 m 时，过渡电阻数值对测距精度的影响较小，而故障位置成为影响测距精度的主要因素，即：当直流线路中间故障时，测距误差较小；而当直流线路两端附近发生故障时，测距误差较大，但均不超过 50 m。这是因为，当直流线路两端附近发生故障时，故障点两侧线路长度差异越大，分布电容电流也越大，同时，行波传递延时较大，对应测量误差较大。

从图 7(b)可看出：参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为 500 m 时，故障位置对测距精度的影响微乎其微，而过渡电阻数值成为影响测距精度的主要因素，过渡电阻越大，测距误差越大，但均不超过 10 m。这是因为，参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值较大时，测量误差将缩小(可参见式(6))，因此，故障位置导致的分布电流、传递延时等误差可忽略，测距精度较高。此外，过渡电阻较大时，测量的电压幅值变化较小，测量误差相对值变大，进而导致更大的测距误差。

通过大量仿真发现：故障位置和过渡电阻数值对测距结果精度影响权重的分界点为当参数  $d_1$ 、 $d_2$

取 250 m 时，测距误差如图 7(c)所示，故障位置和过渡电阻同时对测距精度产生影响。

### 3.3 噪声对测距性能的影响

在实际环境中，总是存在各种噪声干扰，为验证所提方法在噪声环境下的性能，将所有故障下得到的电压均叠加 SNR 为 40 dB 的高斯白噪声，故障测距误差如图 8 所示。

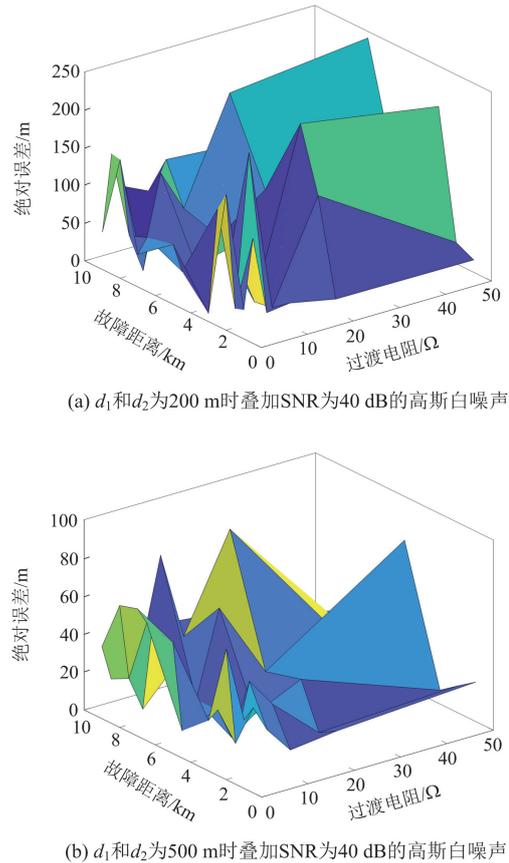


图 8 背景噪声下的故障测距误差

Fig. 8 Fault location errors with background noises

对比图 7 与图 8 可发现，在噪声环境下，测距误差显著增大，且具有明显的不确定性。参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为 200 m 时，测距误差由不超过 50 m 增加为不超过 250 m；而当参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为 500 m 时，测距误差由不超过 10 m 增加为不超过 100 m。此外，从图 8 还可发现，过渡电阻越大，信号变化幅值越小，对噪声更为敏感。从上述仿真结果可看出，噪声导致了测距性能的下降，但精度依然在可接受的范围内，本文提出的方法依然具有工程实用价值。

### 3.4 数据长度的影响

为研究用于故障测距的数据点数目  $n$  对测距精度的影响，本文进行了不同数据点数目  $n$  下的仿真，

结果如图 9 所示。仿真时, 假定直流线路 ab 不同位置发生过渡电阻为  $2\ \Omega$  的单极接地故障, 参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值为  $500\ \text{m}$ , 叠加 SNR 为  $40\ \text{dB}$  的高斯白噪声。从图 9 中可看出: 在噪声环境下, 总的来看, 随着数据点数目  $n$  由 10 增加至 15, 再增至 20, 平均测距绝对误差随之减小。然而, 直流断路器在故障后将快速切除故障, 留给故障测距的数据时间窗长度有限, 即在实际工程中, 数据点数目  $n$  不可能无限大。

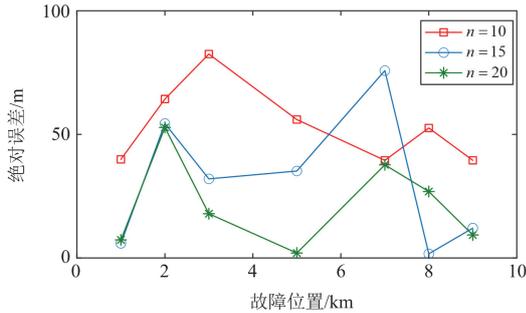


图 9 不同数据点数目下的测距误差

Fig. 9 Fault location errors in different numbers of sample points

### 3.5 采样不同步的影响

本文所提故障测距方法要求所有测量点数据同步, 在实际情况下, 可能存在测量点数据采样不同步, 进而导致测距误差。为研究采样不同步对故障测距的影响, 在参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为  $500\ \text{m}$  的情况下, 假定在直流线路 ab 不同位置发生过渡电阻为  $2\ \Omega$  的单极接地故障, 仿真中, 为减小随机误差干扰, 不添加噪声, 结果如图 10 所示。

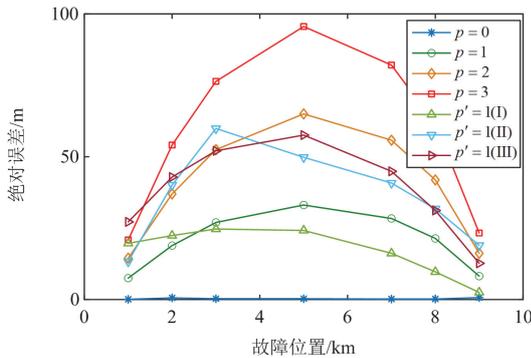


图 10 采样不同步下的测距误差

Fig. 10 Fault location errors in asynchronous sampling

图 10 中, 直流线路 ab 中的 a、b 两端采样不同步导致的采样点相差(错位)数  $p$  分别取 0、1、2 与 3。此外, 4 个测量点间的采样点随机相差数  $p'$  取为 1, 分为 3 种情况: I) a 领先  $a_1$ , b 领先  $b_1$  一个采样点; II) a 落后  $a_1$ , b 领先  $b_1$  一个采样点; III) a 落后  $a_1$ , b 落后  $b_1$  一个采样点。采样频率为  $10\ \text{kHz}$  时, 采样

间隔为  $100\ \mu\text{s}$ , 相差一个采样点对应的数据同步时间偏差介于  $50\sim 150\ \mu\text{s}$  之间。从图 10 中可看出, 采样点相差(错位)数  $p$  越大, 测距误差越大, 但即使在  $p=3$  的情况下(即最大同步误差为  $350\ \mu\text{s}$  时), 测距误差依然小于  $100\ \text{m}$ , 也就是说, 本文所提测距方法在采样不同步的情况下仍表现出良好的性能。从图 10 还可看出: 测量点数据采样不同步的情况下, 故障位于直流线路中间时, 测距误差相对较大。

### 3.6 双极短路故障测试结果

当直流线路发生双极短路故障时, 只需将对地电压变为极间电压, 便可采用本文提出的方法进行故障测距。仿真在直流线路 ab 不同位置发生双极短路故障, 在测量信号中叠加 SNR 为  $40\ \text{dB}$  的高斯白噪声, 测距误差如图 11 所示。从图 11 可看出: 与单极接地故障类似, 参数  $d$  取值越大, 测距误差越小, 且直流线路中间发生双极短路故障时的测距误差小于直流线路两端发生故障时的测距误差, 当  $d=500\ \text{m}$  时, 测距绝对误差小于  $75\ \text{m}$ 。

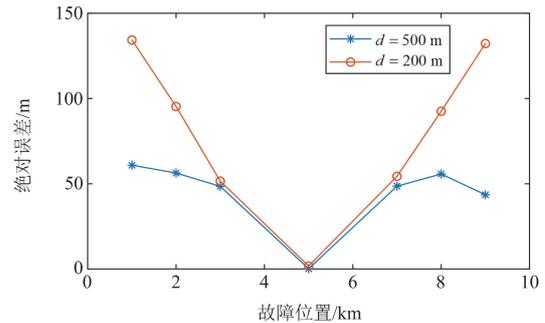


图 11 双极故障时的测距误差

Fig. 11 Fault location errors in pole-to-pole faults

### 3.7 线路限流电抗器的影响

直流线路故障后的故障回路阻抗通常较小, 需要在线路两端安装限流电抗器(current limiting reactor, CLR), 避免快速上升的故障电流损坏 VSC 换流器、断路器等设备。对直流配电线路来说, 若在其两端串联安装 CLR, 线路故障后, CLR 具有通低频、阻高频的特性, 限制了 VSC 直流侧大电容的影响, 使故障回路串联的等效电容变小, 导致二阶衰减振荡的直流电压的振荡频率显著提高, 产生高频衰减振荡, 线路端口的电压将急剧变化, 有可能对本文提出的故障测距方法产生影响。为研究 CLR 的影响, 本文仿真在线路不同位置发生  $1\ \Omega$  过渡电阻的单极接地故障, 并在每一条直流线路的两端串联 1、2 和 3 mH 感抗的 CLR, 得到的故障测距结果如图 12 所示。从图 12 中可发现, 故障发生在线路中间时, 不同大小的 CLR 对测距精度影响都很小, 而当故障

发生在线路端口附近时,对测距精度有一定影响,且 CLR 越大,测距精度越低,原因是此时在线路端口发生了高频衰减振荡,电压急剧振荡,且振荡时间较长,对故障测距精度产生了一定的负面影响。

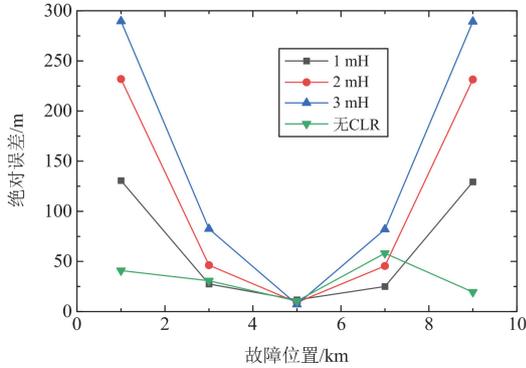


图 12 CLR 大小对测距精度的影响

Fig. 12 Influence of different values of CLR on location accuracy

### 3.8 对比其他测距方案

文献[21]将直流线路等效为  $\Pi$  模型,通过直流线路上两个测量点的电压/电流信号(对应图 3 中的 a 和  $a_1$ )计算故障距离  $\hat{x}$ ,即

$$\hat{x} = \frac{u_a - R_f i_a}{u_a - u_{a1}} d_1 \quad (13)$$

式中:  $i_a$  为 a 端直流电流;  $R_f$  为故障过渡电阻。该方法需首先计算  $R_f$ ,文献[21]通过求解故障回路方程获得  $R_f$ ,可能存在误差。另外,该方法假设 a 端直流电流等于故障点电流  $i_f$ ,对于多电源系统,这一假设也存在较大误差。

为便于比较不同方法的测距精度,本文将仿真设定的过渡电阻值直接代入式(13)计算,消除过渡电阻计算误差引起的测距误差,并将  $i_a$  替换为  $i_a + i_b$ ,  $i_b$  为 b 端的直流电流。假定直流线路 ab 不同位置发生故障,采用本文提出的方法与文献[21]提出的方法进行故障测距,测距误差如表 3 所示。在仿真中,不添加背景噪声,参数  $d_1$ 、 $d_2$  取值均为 250 m。

表 3 不同方法下的故障测距误差

Table 3 Fault location errors with different methods

位置/ km	$R_f = 0.01 \Omega$		$R_f = 5 \Omega$		$R_f = 10 \Omega$	
	$ e /m$	$ e_1 /m$	$ e /m$	$ e_1 /m$	$ e /m$	$ e_1 /m$
1	17.11	39.9	18.54	33.5	19.28	17.8
3	9.44	148.4	9.72	122.1	10.64	125.1
5	1.6	279.1	0.81	212.1	1.74	214.2
7	6.9	451.3	7.58	278.3	6.37	264.9
9	16.17	506.6	16.33	494.9	14.81	386.9

表 3 中,  $|e_1|$  和  $|e|$  分别为文献[21]提出的方法和本文所提方法对应的测距误差,可以看出:即使进行了大量理想化假设,当位置超过 1 km 时,文献[21]提出的方法对应的测距误差  $|e_1|$  远大于本文所提方法对应的测距误差  $|e|$ ,且故障位置距端点 a 越远,测距误差  $|e_1|$  越大。此外,若考虑背景噪声,文献[21]提出的方法导致的测距误差更大,因为该方法仅利用单个测量点的信息计算故障距离。从以上分析可看出,本文所提方法的性能要远优于文献[21]提出的方法,具有更好的工程实用价值。

此外,本文仿真在直流线路不同位置(1、3、5、7 和 9 km)发生正极经  $2 \Omega$  过渡电阻的接地故障,采样率为 10 kHz,不同测距方法下测距绝对误差的对比情况如表 4 所示。本文方法采用线路依频模型,  $d$  取 500 m,在无噪声情况下,测距误差小于 1 m,接近理想值。在测量的信号中叠加信噪比为 40 dB 的噪声后,不同位置的测距误差仍然小于 60 m。对于 D 型行波测距<sup>[10]</sup>,当采样率为 10 kHz 时(即采样间隔为 0.1 ms),一个采样点误差导致的测距误差已经超过线路全长,因此当线路较短时,较低的采样率无法进行测距。当采样率增大到 500 kHz,测距理论上可行,然而由于直流并联大电容的存在,直流电压不产生突变,使得通过离散小波变换捕捉的故障初始行波波头也存在较大误差,导致测距误差较大。对于固定集中线路参数模型的定位方法<sup>[20]</sup>,并采用改进的差分计算方法,当仿真模型中的线路模型为固定集中参数的  $\Pi$  模型时,测距误差接近理论值,绝对误差小于 20 m,当采用更为精确的依频线路模型时,最大测距误差已经超过 1 km,且测距过程中存在较大的波动。

表 4 不同测距方法下测距绝对误差的对比结果

Table 4 Comparison results of location absolute errors with different methods

方法	工况	不同故障位置下的绝对误差/m				
		1 km	3 km	5 km	7 km	9 km
本文	无噪声	0.1	0.3	0.3	0.2	0.7
	40 dB	40.9	30.7	10.6	58.1	19.5
文献[10]	10 kHz	41 000	28 000	30 000	17 000	41 000
	500 kHz	5000	10 000	7500	2500	6500
文献[20]	依频模型	90	100	200	300	1200
	$\Pi$ 模型	1.6	11.1	13.3	5.1	2.1

为了进一步说明本文测距方法的优越性,将本文方法与行波测距法<sup>[9]</sup>、测距式保护法<sup>[12]</sup>和求解故障回路方程法<sup>[20]</sup>分别从噪声、采样率、直流线路参数频变特性、复杂网络和过渡电阻 5 个维度进行对

比, 结果如图 13 所示。文献[9]采用的行波测距法, 更适用于传统高压直流系统, 其本质是通过获取行波波头的到达时间差来进行测距, 需要高采样率, 且依赖行波波头到达时刻的准确标定, 在复杂配电系统中, 行波多次折射、反射的干扰难以排除。文献[12]和文献[20]将直流线路参数等效为固定集中参数的模型, 通过求解故障回路参数得到故障距离。由于直流故障时, 故障信号包含了各种频率分量, 不存在基频分量, 线路参数的依频特征需要考虑在内。因此, 在仿真时, 如果将直流线路等效为集中参数模型, 定位算法会获得很高的定位精度, 但如果将线路变为依频变化模型, 则会产生很大的误差。本文方法虽需增设电压测量点, 但仅利用了电压沿线路均匀分布特点, 具有很强的抗干扰能力。

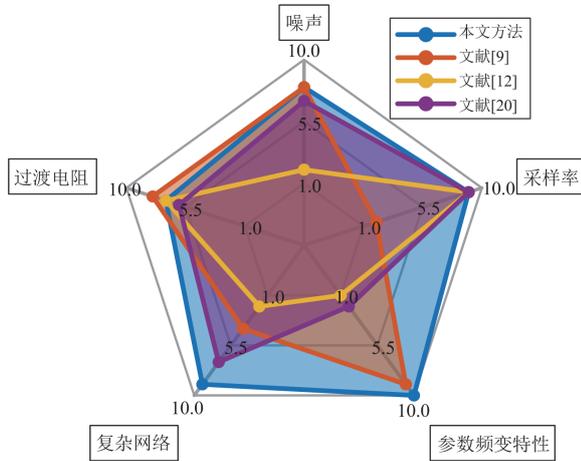


图 13 不同方法的对比结果

Fig. 13 Comparison results of different methods

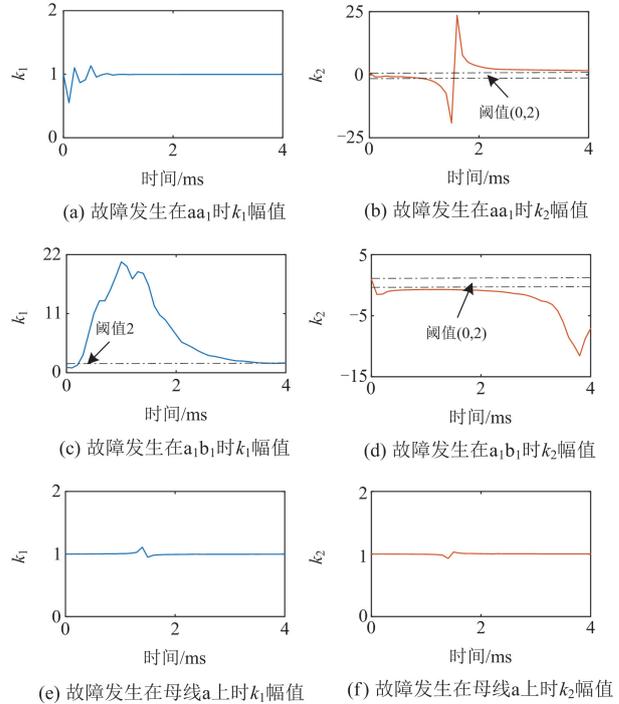
### 3.9 测距式后备保护方案有效性

本文提出的方法仅能对发生在直流线路测量点  $a_1$  与  $b_1$  之间的故障进行测距, 为弥补这一缺陷, 本文提出了能判断故障区域的后备式保护, 通过参数  $k_1$  和  $k_2$  的数值判断故障区域。图 14 分别给出了故障发生在不同区域时的参数  $k_1$ 、 $k_2$  的取值, 具体如下。

1) 当故障发生在端点  $a$  与测量点  $a_1$  之间时, 参数  $k_1$  始终位于区间(0, 2)之内, 而参数  $k_2$  的幅值在故障后短时间内接近 25, 位于区间(0, 2)之外, 分别如图 14(a)和图 14(b)所示。根据本文提出的判别方法, 便可判断故障发生在端点  $a$  与测量点  $a_1$  之间。

2) 当故障发生在直流线路测量点  $a_1$ 、 $b_1$  之间时, 参数  $k_1$ 、 $k_2$  的幅值均位于区间(0, 2)之外, 分别如图 14(c)和图 14(d)所示。根据本文提出的判别方法, 便可判断故障发生在直流线路测量点在  $a_1$ 、 $b_1$  之间。

3) 当母线  $a$  发生故障时, 参数  $k_1$ 、 $k_2$  的幅值均位于区间(0, 2)内, 分别如图 14(e)和图 14(f)所示。根据本文提出的判别方法, 便可判断故障发生在直流母线  $a$  上。

图 14 不同故障区域下参数  $k_1$ 、 $k_2$  取值Fig. 14 Parameters  $k_1$  and  $k_2$  with different fault areas

从以上分析可看出, 本文所提的测距式后备保护方案能够准确判断故障区域, 可作为单端量主保护的后备保护方案, 提高系统保护可靠性。

## 4 结论

本文提出了一种直流配电系统故障测距方法, 并设计了测距式后备保护方案用于判断故障区域, 所提测距方法具有下述特点。

1) 与绝大多数现有方法不同, 所提方法利用电压沿线路非故障部分均匀分布的特点进行测距, 不受线路参数依频特性的影响, 精度较高。

2) 由于在理论上消除了过渡电阻的影响, 本文所提的方法具备大电阻接地故障测距能力。

3) 基于 PSCAD/EMTDC 的仿真实验表明, 本文所提方法在噪声环境与采样不同步等情况下仍具有较高的测距精度。

## 参考文献

- [1] 王鹤, 韦搏, 李石强, 等. 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 61-72.

- WANG He, WEI Bo, LI Shiqiang, et al. Fault diagnosis of a DC distribution network based on Bayesian network information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(5): 61-72.
- [2] 霍竞冲, 孟润泉, 李胜文, 等. 低压直流配电系统极间短路故障分析与保护[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(5): 1-10, 19.
- HUO Jingchong, MENG Runquan, LI Shengwen, et al. Analysis and protection for pole-to-pole short-circuit faults of the LVDC distribution system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(5): 1-10, 19.
- [3] 贾科, 施志明, 张旸, 等. 基于电缆早期故障区段定位的柔性直流配电系统保护方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 163-171.
- JIA Ke, SHI Zhiming, ZHANG Yang, et al. Protection method for flexible DC distribution system based on cable incipient fault section location[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 163-171.
- [4] 王晓卫, 田影, 高杰, 等. 基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配电网故障检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 1-15.
- WANG Xiaowei, TIAN Ying, GAO Jie, et al. A DC distribution network fault detection method based on bump fluctuation at a dense inflection point[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 1-15.
- [5] 张文杰, 吕世轩, 高启瑄, 等. 基于固态变压器的交直流混合配电系统协调运行控制策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 103-112.
- ZHANG Wenjie, LÜ Shixuan, GAO Qixuan, et al. Coordinated operation control strategy of AC/DC hybrid distribution system based on solid-state transformer[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(4): 103-112.
- [6] HE J, NIE M, LI M, et al. Dynamic state estimation based protection for flexible DC grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(3): 3069-3079.
- [7] 余修勇, 肖立业. 直流配电网故障识别和定位技术研究综述[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(7): 56-66.
- YU Xiuyong, XIAO Liye. An overview of fault identification and location technology for DC distribution networks[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(7): 56-66.
- [8] 陈福锋, 杨黎明, 宋国兵, 等. 主动探测式保护关键技术概述及展望[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 175-186.
- CHEN Fufeng, YANG Liming, SONG Guobing, et al. Overview and prospect of key technologies for active detection protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 175-186.
- [9] WANG J, ZHANG Y. Traveling wave propagation characteristic-based LCC-MMC hybrid HVDC transmission line fault location method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(1): 208-218.
- [10] 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.
- [11] 汪光远, 马啸, 林湘宁, 等. 基于集成学习的柔性直流配电线路单端量高灵敏保护方案[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8447-8463.
- WANG Guangyuan, MA Xiao, LIN Xiangning. Single-ended high-sensitivity protection scheme for flexible DC distribution line based on ensemble learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8447-8463.
- [12] 李猛, 贾科, 毕天姝, 等. 适用于直流配电网的测距式保护[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 719-724.
- LI Meng, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Fault distance estimation-based protection for DC distribution networks[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(3): 719-724.
- [13] 王国钰, 范春菊, 黄玥. 基于暂态电压比初始值和时域迭代的直流配电网单端测距方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(11): 82-88.
- WANG Guoyu, FAN Chunju, HUANG Yue. Single-terminal fault location method in DC distribution network based on initial ratio of transient voltage and time-domain iteration[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(11): 82-88.
- [14] 兰征, 袁英硕, 何东, 等. 一种基于电流微分初始值的直流配电网故障定位方法[J]. *南方电网技术*, 2023, 17(5): 109-116.
- LAN Zheng, YUAN Yingshuo, HE Dong, et al. A fault location method for DC distribution network based on differential initial value of current[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(5): 109-116.
- [15] 杨欢红, 朱子叶, 黄文焘, 等. 基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 66-75.
- YANG Huanhong, ZHU Ziyue, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 66-75.
- [16] WANG D, PSARAS V, EMHEMED A A S, et al. A novel fault let-through energy based fault location for LVDC distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power*

- Delivery, 2021, 36(2): 966-974.
- [17] NOUGAIN V, MISHRA S, NAG S S, et al. Fault location algorithm for multi-terminal radial medium voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4476-4488.
- [18] MOHANTY R, PRADHAN A K. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6328-6337.
- [19] FENG X, QI L, PAN J. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1834-1840.
- [20] DHAR S, PATNAIK R K, DASH P K. Fault detection and location of photovoltaic based DC microgrid using differential protection strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4303-4312.
- [21] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2318.
- [22] PARK J D, CANDELARIA J, MA L Y, et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [23] MOHANTY R, BALAJI U S M, PRADHAN A K. An accurate noniterative fault-location technique for low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 475-481.
- [24] 林芳雯, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于视在伪阻抗辨识的直流配电电缆单端在线故障定位方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2555-2561.
- LIN Fangwen, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. One-terminal on-line fault location method for DC distribution cable based on apparent pseudo-impedance identification[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2555-2561.
- [25] DIAO X, LIU F, SONG Y, et al. An integral fault location algorithm based on a modified t-source circuit breaker for flexible DC distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2861-2871.
- [26] ZHANG Y, JIA K, LI Y, et al. Incipient fault detection-based active protection of photovoltaic DC integration system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1198-1208.
- [27] 刘子奕, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 21-30.
- LIU Ziyi, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. An active converter injection-based fault location method for a flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 21-30.
- [28] MORCHED A, GUSTAVSEN B, TARTIBI M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1032-1038.
- 
- 收稿日期: 2024-08-20; 修回日期: 2024-10-24
- 作者简介:
- 李 洁(1972—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型配电系统运行与管理、电力营销与综合能源服务等; E-mail: uulijie@sina.com
- 李亚飞(1991—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为新型配电系统运行与管理、电动汽车充换电与综合能源服务; E-mail: liyafei1991@163.com
- 张新松(1980—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统规划与运行。E-mail: zhang.xs@ntu.edu.cn
- (编辑 张颖)