

# 基于模量网络分析的接地极线路故障定位新算法

张钥朗<sup>1,2</sup>, 李小鹏<sup>1,3</sup>, 卢继平<sup>2</sup>, 滕予非<sup>1,3</sup>, 庄 祎<sup>4</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;  
2. 重庆大学 电气工程学院 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;  
3. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 4. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221005)

**摘要:**针对直直接地极线路发生远距离、高阻接地故障时, 现有故障定位算法精度低的问题, 提出了一种基于模量网络分析的接地极线路故障定位新算法。基于线路的分布参数模型, 建立了故障后接地极线路故障模量网络, 在此基础上利用接地极线路量测端的电压、电流量计算沿线的电压、电流分布, 进而得到故障点处的测量阻抗, 根据故障点处测量阻抗虚部最小的特点进行故障定位。大量仿真结果表明, 该算法可实现接地极线路全长范围内的精确定位, 且不受故障位置和分布电容的影响, 具有较高的故障定位精度。

**关键词:**特高压直流输电; 接地极线路; 测量阻抗; 故障定位; 特征谐波

**中图分类号:** TM761; TM721.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202211024

## 0 引言

特高压直流输电(ultra-high voltage direct current, UHVDC)系统具有传输容量大、输电距离远、线路损耗低的优点, 同时不存在无功平衡、频率稳定、系统同步等问题。因此, UHVDC被广泛应用于远距离大容量的电能传输以及非同步电网的异步互联<sup>[1-3]</sup>。UHVDC系统处于双极大地回线运行方式下, 接地极起到流通系统不平衡电流和钳制中性点电压的作用。若双极直流输电系统发生单极故障闭锁, 则正常极会采用单极-大地回线方式运行, 此时直流系统的运行电流会通过接地极线路流入大地<sup>[4]</sup>。为避免直流偏磁对换流站设备的影响和大电流入地威胁人畜安全, 部分接地极线路的长度已超过100 km。接地极线路采用同塔双回线路并联方式运行, 随着接地极线路长度的增加, 在恶劣的天气和地理条件下运行使得接地极线路很容易出现故障<sup>[5-6]</sup>。因此, 实现快速、高精度的接地极线路故障定位, 有利于及时清除接地极线路故障, 提高直流系统的运行可靠性<sup>[7-8]</sup>。

接地极线路的故障定位方法主要分为脉冲注入法、故障行波法和故障分析法。文献[9]利用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)子模块可实现主动控制的特性, 向接地极线路注入不平衡谐波分量, 在此基础上以故障点接地电阻特性构造接地极线路故障测距算法。此方法精度较高, 但仅针对柔性直流输电系统。文献[10-11]通

过周期性地向接地极线路注入脉冲, 并利用故障点反射波完成故障定位, 受其原理和注入脉冲的影响, 该方法需安装额外的信号注入设备, 且接地极线路发生近端故障和瞬时性故障时方法易失效。基于行波的算法根据故障暂态行波沿接地极线路传播的时间来估算故障位置, 这种算法的定位精度取决于行波波头的准确识别和行波波速的计算精度<sup>[12]</sup>。文献[13]提出利用形态学梯度变换检测故障行波中的突变点获取行波波头, 进而实现接地极线路的单端行波测距。但UHVDC系统处于双极平衡运行方式下, 接地极线路中的行波信号较弱难以准确检测, 利用故障暂态行波的测距算法将难以适用。故障分析法<sup>[14]</sup>是基于接地极线路的线路参数和两端量测信号, 获取沿线电压和等效阻抗的分布规律, 从而利用规律特征得出故障点位置的方法。文献[14]利用接地极线路会流过不超过额定电流1%的不平衡电流, 提出了一种基于 $\pi$ 型等效线路模型的谐波分量测距函数。但该方法在接地极线路发生远距离、高阻故障时定位结果误差较大。文献[15-16]提出了根据故障点或极址点为全线电压最小值点的特点构造故障测距函数的方法, 但仍然不适用于接地极线路远端故障。

根据相关研究和实际工程调研发现, 由于实际设备参数及双极触发角存在差异, 接地极线路会流过一定的不平衡电流。本文通过建立接地极线路故障模量网络, 利用不平衡电流蕴含的特征谐波分量计算接地极沿线电气量分布和测量阻抗, 基于故障点测量阻抗虚部最小的特征提出了一种适用于接地极线路接地故障的定位算法。理论上该方法不受故障距离、分布电容的影响, PSCAD和MATLAB仿真计算结果表明其具有较高精度。

收稿日期: 2022-04-29; 修回日期: 2022-08-11

在线出版日期: 2022-11-25

基金项目: 四川省杰出青年科技人才项目(2021JDJQ0035)

Project supported by the Science and Technology Project of Sichuan Province for Distinguished Young Scholars (2021JDJQ0035)

### 1 接地极线路模型

在目前投运的 UHVDC 系统中,接地极线路通常采用两回导线并行架设,其具体结构如图 1 所示。图中: $U_M$ 、 $I_M$  分别为接地极线路首端(M 端)的测量电压、电流; $I_I$ 、 $I_{II}$  分别为接地极线路 I、II 的入线电流。为了消除谐波分量在接地极线路末端的反射,提高沿线分布电压和电流的计算精度,在接地极线路末端装设一个匹配电阻  $R_p$ ,其阻值等于接地极线路波阻抗。为了减少匹配电阻对实际运行的影响,在匹配电阻两端并联一个滤波频率等于特征谐波频率的 LC 带阻滤波器,其作用是为直流分量提供通路。

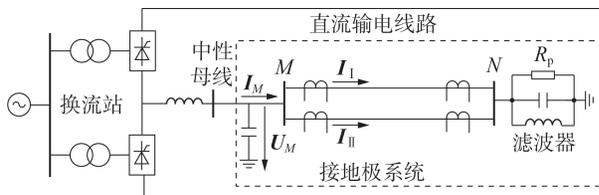


图 1 接地极系统结构

Fig.1 Structure of grounding electrode system

在进行接地极线路故障定位时,部分文献采用简化的平行双回线模型,忽略了分布电容或线间耦合电感的影响,使得测距精度难以得到保证。为更准确地反映接地极线路沿线电压、电流的分布,必须考虑线路的分布电容和线间互感。本文利用图 2 所示的线路分布参数模型开展接地极线路故障定位。图中: $Z=R+j\omega L$ 、 $Y=G+j\omega C$  分别为线路的单位长度阻抗和导纳, $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$  分别为线路单位长度电阻、电感、电导、电容, $\omega$  为系统角频率; $x'$  处的电压  $U_1$ 、电流  $I_1$  分别记为首端电压、电流; $x$  为计算点距线路首端的距离; $U_2$ 、 $I_2$  分别为计算点处的电压、电流。

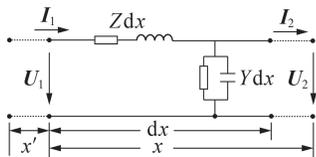


图 2 线路的分布参数模型

Fig.2 Distributed parameter model of line

线路  $x'$  处在  $dx$  微元阻抗上的相量方程<sup>[17]</sup>如式(1)所示。

$$\begin{cases} -\frac{dU_1}{dx} = (R+j\omega L)I_1 = ZI_1 \\ -\frac{dI_1}{dx} = (G+j\omega C)U_1 = YU_1 \end{cases} \quad (1)$$

根据线路首端的边界条件可对式(1)进行化简,并求得距线路首端  $x$  处的电压  $U_2$  和电流  $I_2$  为:

$$\begin{cases} U_2 = \cosh(\gamma x)U_1 - Z_c \sinh(\gamma x)I_1 \\ I_2 = -\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c}U_1 + \cosh(\gamma x)I_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} \\ Z_c = \sqrt{(R+j\omega L)/(G+j\omega C)} \end{cases}$$

式中: $\gamma$  为线路的传播常数; $Z_c$  为波阻抗。

由于导线间存在复杂的电磁耦合会影响接地极沿线电压、电流分布的准确计算。因此,为了消除两回线路耦合效应的影响,本文基于二阶凯伦贝尔变换将接地极线路首、末两端电压电流矩阵解耦成相互独立的模分量<sup>[4]</sup>。以接地极线路正常运行为例,可以得到接地极线路首、末两端的零模分量和线模分量为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{M0} & I_{M0} \\ U_{M1} & I_{M1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{M1} & I_{M1} \\ U_{MII} & I_{MII} \end{bmatrix} = \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 2U_M & I_M \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{N0} & I_{N0} \\ U_{N1} & I_{N1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{N1} & I_{N1} \\ U_{NII} & I_{NII} \end{bmatrix} = \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 2U_N & I_N \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U$ 、 $I$  分别为电压、电流;下标 I、II 分别表示接地极线路回线 I、II,下标  $M$ 、 $N$  分别表示接地极线路的首、末端,下标 0、1 分别表示零模、线模分量,后同(例如  $U_{M0}$ 、 $U_{M1}$  和  $I_{M0}$ 、 $I_{M1}$  分别为线路首端电压和电流的零模、线模分量)。

### 2 故障定位原理

#### 2.1 故障定位原理及分析

本文所提故障定位算法基于接地极线路解耦后的模量网络,并利用线路两端模量信号求取接地极沿线的电压分布和电流分布,再通过相模反变换可得接地极线路故障点电压和电流,最后根据故障点接地阻抗不显感性和容性的特征<sup>[15]</sup>,构造只包含一个未知量的故障定位函数,如式(4)所示。

$$G(d) = \left| \operatorname{Im} \left( \frac{U_F(d)}{I_F(d)} \right) \right| \quad (4)$$

式中: $U_F(d)$ 、 $I_F(d)$  分别为接地极线路距首端  $d$  处的故障点  $F$  的电压、电流。接地极线路发生故障后,线路保护装置向运行人员发出保护告警信号,同时测距装置自动提取接地极线路量测端特征谐波量,并根据接地极线路阻抗和导纳参数进行全线的电压、电流分布计算,求解  $G(d)$  取得最小值时所对应的距离  $d$  即为故障点位置。

## 2.2 接地极线路模量网络分析与沿线电气量计算

接地极线路发生单回线接地故障时的等效线路模型如图3(a)所示。设故障发生在回线Ⅱ,故障点 $F$ 处距首端 $M$ 的距离为 $d$ ,过渡电阻为 $R_g$ ,线路长度为 $l$ ,故障点边界条件为: $I_{F1}=0, U_{FII}=I_{FII}R_g$ 。其中: $I_{F1}$ 、 $I_{FII}$ 分别为回线Ⅰ、Ⅱ上的故障点 $F$ 处对应的电流; $U_{FII}$ 为回线Ⅱ上故障点 $F$ 处对应的电压。匹配电阻在零模网络中等效为 $2R_p$ 。

根据上文的理论分析,2条接地极线路之间存在电磁耦合,为保证故障定位算法的精确性,需对接地极线路解耦。其中接地极线路首、末端电气量解耦参照式(3),故障点处的解耦变换如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{F0} \\ U_{F1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{F1} \\ U_{FII} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} U_{F1} + U_{FII} \\ U_{F1} - U_{FII} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{FII} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ -I_{FII} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

因此,接地极线路发生单回线接地故障的模量网络如图3(b)所示。图中:首端线模电压 $U_{M1}=0$ ,零模电压 $U_{M0}=\sqrt{2}U_M$ ;故障点处线模电压和零模电压均不为0; $I'_{F1}$ 、 $I''_{F1}$ 和 $I'_{F0}$ 、 $I''_{F0}$ 分别为线模和零模网络中故障点左右侧的电流。

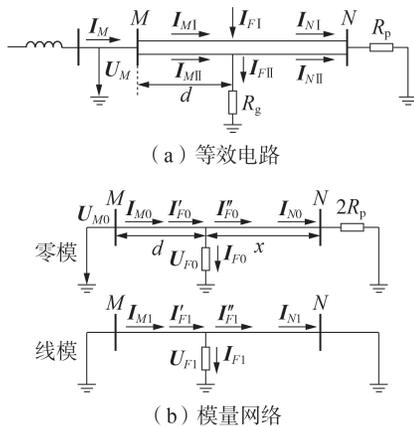


图3 单回线接地故障等效电路和模量网络  
Fig.3 Equivalent circuit and modulus network of single-line grounding fault

接地极线路解耦后,零模、线模分量相互独立且不存在电磁耦合,故可利用长线方程式(2)计算模量网络中任意一点处的电压、电流。基于解耦后的模量网络计算故障点零模电压 $U_{F0}$ 和线模电压 $U_{F1}$ 为:

$$\begin{cases} U_{F0} = \cosh(\gamma_0 d) U_{M0} - Z_{C0} \sinh(\gamma_0 d) I_{M0} \\ U_{F1} = -Z_{C1} \sinh(\gamma_1 d) I_{M1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\gamma_0$ 、 $\gamma_1$ 、 $Z_{C0}$ 、 $Z_{C1}$ 的计算公式详见文献[4]。

在线模分量网络中,对于被故障点划分的2段线路, $M$ 端和 $N$ 端电压可列出以下等式:

$$\begin{cases} 0 = \cosh(\gamma_1 d) U_{F1} + Z_{C1} \sinh(\gamma_1 d) I'_{F1} \\ 0 = \cosh(\gamma_1 x) U_{F1} - Z_{C1} \sinh(\gamma_1 x) I''_{F1} \end{cases} \quad (7)$$

进而求解式(7)可得:

$$I_{F1} = I'_{F1} - I''_{F1} = I'_{F1} \frac{\coth(\gamma_1 d) + \coth(\gamma_1 x)}{\coth(\gamma_1 d)} \quad (8)$$

式中: $x=l-d$ ;  $I'_{F1} = \cosh(\gamma_1 d) I_{M1}$ 。

联立式(6)、(8),利用相模反变换可得故障点电压和电流为:

$$\begin{cases} \sqrt{2} U_{FII} = U_{F0} - U_{F1} = \cosh(\gamma_0 d) U_{M0} - Z_{C0} \sinh(\gamma_0 d) I_{M0} + Z_{C1} \sinh(\gamma_1 d) I_{M1} \\ \sqrt{2} I_{FII} = I_{F0} - I_{F1} = -2I_{F1} \end{cases} \quad (9)$$

利用式(9)计算得到故障点电压 $U_{FII}$ 和故障点电流 $I_{FII}$ 并代入式(4),最小阻抗虚部对应的距离 $d$ 即为故障点位置。

同理,接地极线路发生双回线接地故障时,故障点边界条件为: $U_{F1} = U_{FII} = R_g I_F, I_{F1} = I_{FII} = I_F/2$ 。故障点处的解耦变换如式(10)所示,对应的故障等效电路和模量网络如图4所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_{F0} \\ U_{F1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{F1} \\ U_{FII} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_F \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{F0} \\ I_{F1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{FII} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_F \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

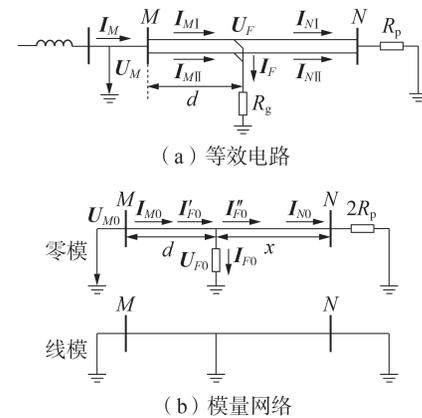


图4 双回线接地故障等效电路和模量网络  
Fig.4 Equivalent circuit and modulus network of double-line grounding fault

与单回线故障不同的是,发生双回线接地故障时线模分量为0,计算故障网络中故障点的电压和电流需利用零模分量网络完成。基于此,零模分量网络中的故障点电压和电流为:

$$\begin{cases} U_{F0} = \cosh(\gamma_0 d) U_{M0} - Z_{C0} \sinh(\gamma_0 d) I_{M0} \\ I_{F0} = I'_{F0} - I''_{F0} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} I'_{F0} = -\frac{\sinh(\gamma_0 d)}{Z_{C0}} U_{M0} + \cosh(\gamma_0 d) I_{M0} \\ I''_{F0} = \frac{\sinh(\gamma_0 x)}{Z_{C0}} I_{N0} 2R_p + \cosh(\gamma_0 x) I_{N0} \end{cases} \quad (12)$$

因此结合式(11)、(12),利用相模反变换可得故障点电压和电流为:

$$\begin{cases} \sqrt{2} U_{FII} = \sqrt{2} U_F = U_{F0} \\ \sqrt{2} I_{FII} = I_{F0} \end{cases} \quad (13)$$

利用式(13)计算得到的故障点电压  $U_{FII}$  和故障点电流  $I_{FII}$ ,代入式(4),其中阻抗虚部最小对应的距离  $d$  即为故障点位置。

### 3 仿真实验

基于 PSCAD / EMTDC 软件搭建含接地极线路的双极 UHVDC 系统仿真模型,并利用 MATLAB 验证本文所提故障定位算法的准确性和有效性。其中,直流系统处于双极运行方式下的额定输送容量为 8 000 MW。流过接地极线路的不平衡电流约为 45 A,接地极线路采用如附录 A 图 A1 所示的频率相关模型,线路长度为 101 km。

#### 3.1 接地极线路频谱分析

换流站作为连接交直流系统的重要组成部分,核心是由非线性电力电子器件构成的换流器。本文所搭建的 UHVDC 系统整流侧和逆变侧均采用 12 脉动换流器。其在交直流电能变换中,会在直流侧产生  $12k$  ( $k$  为自然数) 次谐波分量。接地极系统正常运行时,对接地极线路量测端电气量进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)频谱分析,可以得到对应的频谱分析图如附录 A 图 A2 所示。根据频谱分析图可知,接地极线路正常运行时,经接地极线路入地的不平衡电流中富含谐波分量,即 600、1 200、1 800 Hz 及其他高次谐波电流。但其中的 600 Hz 谐波分量(12 次谐波)在所有特征谐波中占主导地位,远高于其他各次谐波分量,与理论分析一致。

#### 3.2 接地极线路故障定位测试

基于本文搭建的仿真模型,设接地极线路  $l_2$  上距首端 75 km 处发生单回线经 200  $\Omega$  过渡电阻接地故障。接地极线路流过的不平衡电流蕴含丰富的谐波分量,且谐波分量来源于换流器,不受接地极线路运行工况的影响,本文所提故障定位算法利用特征谐波中的 600 Hz 谐波分量(12 次谐波),为保证实际工程中电气量采集的准确性,数据采集频率为 100 kHz。鉴于 S 变换具有良好的时频特性,本文在 MATLAB 中利用 S 变换提取故障后电压、电流中的 12 次谐波分量进行故障定位算法验证,结果如图 5 所示。由图可见,定位函数  $G(d)$  在 75.1 km 和 101 km

处取得最小值,分别对应故障点位置和极址点,此时的故障定位绝对误差为 0.1 km。

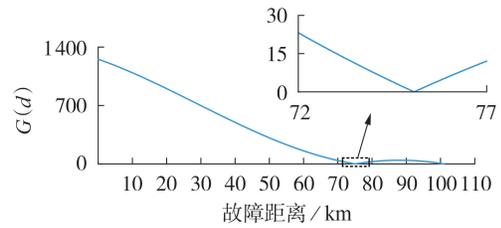


图 5 单回线接地故障定位结果

Fig.5 Location results of single-line grounding fault

接地极线路发生故障后,测距装置只需采集 2 ms 的数据窗,利用 S 变换提取 12 次谐波电气量即可实现准确故障定位。该方案既能保证定位精度,也能减小定位方法的运算量。为进一步验证本文所提算法的有效性,设置接地极线路在不同故障位置发生单回线接地故障和双回线接地故障进行仿真,考虑的最大过渡电阻为 200  $\Omega$ ,具体的定位结果如表 1 和附录 A 表 A1 所示。

表 1 单回线接地故障定位结果

Table 1 Location results of single-line grounding fault

故障位置 / km	过渡电阻 / $\Omega$	故障定位结果 / km	误差 / %
15	0	14.953	0.046
	200	14.918	0.081
25	0	25.059	0.058
	200	24.898	0.101
35	0	35.068	0.067
	200	34.905	0.094
45	0	45.037	0.036
	200	45.110	0.109
55	0	54.965	0.035
	200	54.812	0.186
65	0	65.033	0.032
	200	64.928	0.071
75	0	75.041	0.041
	200	75.098	0.096
85	0	85.086	0.085
	200	84.853	0.145
99	0	99.043	0.042
	200	98.893	0.105

根据仿真结果可知,本文所提故障定位算法在接地极线路全长范围内均可实现准确的故障定位,定位误差不超过接地极线路全长的 1%,满足工程要求。故障定位结果在过渡电阻增加至 200  $\Omega$  时误差稍有增大,这主要是由于较大的过渡电阻会使得沿线电压和电流分布的计算值与实际值偏差增大,进而影响了测距精度,但误差仍小于接地极线路全长的 1%,而接地极线路一般可不考虑大过渡电阻的故障工况。

#### 3.3 采样频率对算法的影响

本文所提算法需要使用接地极线路首末两端电

流测点的采集数据,因此本节针对不同采样频率对算法定位精度的影响进行了仿真,结果如图6所示。

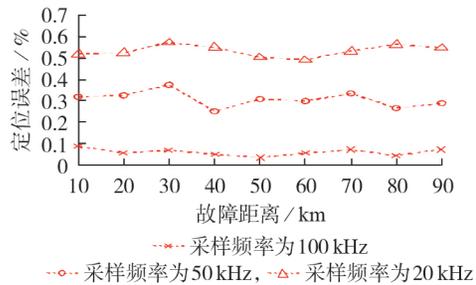


图6 不同采样频率下的故障定位误差  
Fig.6 Fault location errors under different sampling frequencies

根据图6可知,采样频率下降时,故障定位误差有所增大,但故障定位精度可以满足实际工程要求。本文旨在实现接地极线路高精度测距,提出了使用100 kHz的采样频率,实际工程中也可以单独考虑提高测距装置的采样频率,进而保证直流接地极线路故障定位的准确性。

### 3.4 线路参数误差和互感器采样误差对算法的影响

根据我国颁布的电力行业标准<sup>[18]</sup>,接地极线路在投入运行前需进行线路参数的测试,测试结果包括本文所需的600 Hz频率分量所对应的接地极线路参数。由于实际运行过程中,温度、湿度等环境的变化会造成接地极线路实际参数与测试参数产生偏差,从而可能影响本文所提故障定位方法的精确性。因此在接地极线路测试参数存在 $\pm 1\%$ 误差时对本文所提故障定位算法进行验证,结果如附录A图A3所示。由图可以看出:当接地极线路测试参数与实际参数存在偏差时,故障定位误差会增大。这是因为本文所推导的故障定位函数需要计算接地极沿线电压和电流分布,而线路参数的偏差必然直接影响到沿线电气量计算的精度,进而影响故障定位算法的准确性。但由图A3可知,存在 $\pm 1\%$ 线路参数误差时,本文所提算法的故障定位误差仍不超过1%,具有较好的鲁棒性。

大部分接地极线路装设的电流测点使用具有较高精度的零磁通电流互感器,即使零磁通电流互感器测量误差较小,但实际工程中仍须考虑互感器的采样误差。对此,分别设置电流互感器存在不同程度幅值误差和相位误差进行仿真验证。其中接地极线路发生单回线接地故障时,部分故障定位结果如附录A表A2所示。由表可见,随着互感器误差的增大,本文所提故障定位算法的定位误差也有增大趋势,但总体而言仍具有较高的定位精度,相对定位误差保持在接地极线路长度1%以内,符合实际工程需求。

### 3.5 系统运行方式对算法的影响

对于双极UHVDC系统而言,除了正常的双极大回线运行方式外,还有因检修或故障等原因转换为单极-大地回线运行方式。此时接地极线路流过的不平衡电流为直流系统的运行电流,较大的不平衡电流可能影响故障定位算法的有效性。基于此,考虑直流系统处于单极-大地回线运行方式下的情况对本文所提故障定位算法进行仿真验证,以进一步验证算法的适应性。仿真模型以接地极线路发生单回线接地故障为例,对应的结果如表2所示。

表2 单极-大地回线方式下的故障定位结果

Table 2 Fault location results under monopolar ground return mode

故障位置/km	过渡电阻/ $\Omega$	故障定位结果/km	误差/%
15	0	14.944	0.055
	200	14.925	0.074
25	0	25.050	0.049
	200	24.909	0.090
35	0	35.057	0.056
	200	34.926	0.073
45	0	45.042	0.042
	200	45.103	0.102
55	0	54.968	0.032
	200	54.877	0.122
65	0	65.045	0.045
	200	64.933	0.066
75	0	75.049	0.048
	200	75.101	0.100
85	0	85.051	0.050
	200	84.882	0.117
99	0	99.039	0.039
	200	98.904	0.095

由表2可以看出,本文所提故障定位算法在直流系统运行方式变化的情况下仍能实现准确的故障定位,其定位精度基本不受运行方式的影响。

### 3.6 噪声干扰对算法的影响

为验证本文所提故障定位算法的抗干扰能力,在仿真获得的接地极线路首末端量测电流数据中分别叠加信噪比为10、20、30 dB的高斯白噪声,同时设定接地极线路在不同故障位置发生接地故障进行仿真,考虑的最大过渡电阻为200  $\Omega$ ,故障定位结果如附录A表A3所示。由表可见,当接地极线路量测信号混入噪声时,故障定位误差比不加噪声时略有增加,随着噪声强度的减小,故障定位误差总体有下降的趋势。由于白噪声本身的随机性,可能出现部分信噪比较高而故障定位误差更大的情况,但最大误差仍然可以保持在1%以内。因此,在噪声干扰的情况下,本文所提故障定位算法仍能保持较高定位精度。

### 3.7 不同故障定位算法的性能对比

本文所提故障定位算法考虑了接地极线间电磁

耦合效应以及线路分布参数模型的频变特性,将其与参考文献[14]提出的基于 $\pi$ 型等效线路模型的接地极线路故障定位算法进行了对比。其中,设置的故障点过渡电阻同为 $0.2\ \Omega$ ,接地极线路长度同为 $80\ \text{km}$ 。2种算法的故障定位误差如图7所示。

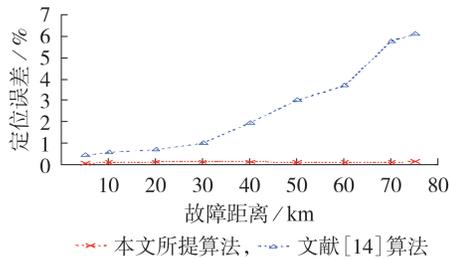


图7 不同故障定位算法的误差对比

Fig.7 Error comparison between different fault location algorithms

对比图7中的2种算法的误差曲线可知:在相同的故障工况下,本文所提的基于分布参数模型的故障定位算法在接地极线路全线范围内的定位精度都相对较高;而基于 $\pi$ 型等效线路模型的故障定位算法在线路远端故障工况下,定位误差较大,不满足现场需求。

## 4 结论

本文基于线路的分布参数模型,利用相模变换矩阵将接地极线路解耦,得到相互独立的接地极线路零模分量和线模分量。在此基础上,利用模分量计算沿线电压、电流分布和测量阻抗,进而提出了一种故障定位算法。大量仿真结果表明,本文所提算法在原理上不受线路分布电容和线间耦合的影响,在接地极线路发生远距离、高阻接地故障时仍能保证很高的测距精度。此外,该方法无需额外的高频信号注入,具有较好的工程实用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 王渝红,陈立维,寇然,等. 基于双判据的特高压直流分层接入系统换相失败预防控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 111-117, 131.  
WANG Yuhong, CHEN Liwei, KOU Ran, et al. Commutation failure prevention control strategy based on double criteria for UHVDC hierarchical connection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 111-117, 131.

[2] 刘守豹,侯玉成,盛明珺,等. 特高压直流换流站金属回线转换开关电磁暂态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 220-226.  
LIU Shoubao, HOU Yucheng, SHENG Mingjun, et al. Analysis of electromagnetic transient characteristics of metallic return transfer breaker in UHVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 220-226.

[3] 孙沛瑶,林圣,刘磊,等. 基于特征谐波测量阻抗的HVDC接地极线路保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):

3212-3222.

SUN Peiyao, LIN Sheng, LIU Lei, et al. A new principle of HVDC ground electrode line protection based on characteristic harmonic measured impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3212-3222.

- [4] 李小鹏,庄祎,卢继平,等. UHVDC接地极线路短路阻抗特性及阻抗监视系统死区研究[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 70-77.  
LI Xiaopeng, ZHUANG Yi, LU Jiping, et al. Research on short-circuit impedance characteristic and dead-zone of supervision system for UHVDC grounding electrode line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 70-77.
- [5] 滕予非,李小鹏,陈福锋,等. 高压直流接地极线路断线故障高频阻抗特性及阻抗监视系统适应性[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 61-66.  
TENG Yufei, LI Xiaopeng, CHEN Fufeng, et al. High frequency impedance characteristics of HVDC grounding electrode line under breakage fault and adaptability of impedance monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 61-66.
- [6] 李小鹏,滕予非,宋新尧,等. 高压直流接地极线路阻抗监视系统断线故障时动作性能评估[J]. 四川电力技术, 2019, 42(4): 7-10.  
LI Xiaopeng, TENG Yufei, SONG Xinyao, et al. Performance evaluation of HVDC electrode line impedance supervision system under line break fault[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(4): 7-10.
- [7] LIN Sheng, LIU Lei, SUN Peiyao, et al. Fault location algorithm based on characteristic harmonic measured impedance for HVDC grounding electrode lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9578-9585.
- [8] 庄祎,李小鹏,滕予非,等. 一种高压直流输电系统接地极线路保护新方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 74-79.  
ZHUANG Yi, LI Xiaopeng, TENG Yufei, et al. Novel method for HVDC power transmission system grounding electrode line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 74-79.
- [9] 李斌,孙强,何佳伟,等. 基于谐波注入的柔性直流系统接地极线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4773-4782.  
LI Bin, SUN Qiang, HE Jiawei, et al. Fault location for grounding electrode line of MMC DC system based on harmonic injection[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4773-4782.
- [10] 张悻宁,郝洪民,李京,等. 脉冲注入法用于直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 63-68.  
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of grounding electrode lines of HVDC system based on injected pulse signals[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 63-68.
- [11] 任鹏飞,谭博学,刘辉,等. 基于脉冲反射原理的HVDC系统接地极引线路故障测距[J]. 山东电力技术, 2017, 44(3): 19-25.  
REN Pengfei, TAN Boxue, LIU Hui, et al. HVDC system grounding line fault location based on the pulse reflection principle[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(3): 19-25.
- [12] 高洪雨,陈青,徐丙垠,等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 121-127.  
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127.
- [13] 张悻宁,王彩芝,李京,等. 直流感地极线路单端行波故障测距算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 91-95.

- ZHANG Yining, WANG Caizhi, LI Jing, et al. Algorithm of fault location by single ended traveling wave on HVDC grounding electrode line[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4):91-95.
- [14] 束洪春, 田鑫萃, 张恽宁. 接地极线路短路故障快速识别及故障测距研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3584-3591.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Yining. Research on short-circuit fault identification and fault location algorithm for HVDC electrode line[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3584-3591.
- [15] 程星星, 张恽宁, 王健, 等. 高压直接地极线路故障特性仿真及其故障测距新算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3):105-110, 114.  
CHENG Xingxing, ZHANG Yining, WANG Jian, et al. HVDC grounding electrode line fault simulation and its new fault location algorithm research[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3):105-110, 114.
- [16] 张恽宁, 束洪春, 翟永昌, 等. 基于两种算法融合的接地极线路故障测距[J]. 高电压技术, 2016, 42(8):2633-2641.  
ZHANG Yining, SHU Hongchun, ZHAI Yongchang, et al. Fault location for grounding electrode line based on fusion of two algorithms[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8):2633-2641.
- [17] 薛士敏, 陆俊弛, 刘冲, 等. 基于虚拟线路阻抗的MMC-HVDC输电系统单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2868-2875.  
XUE Shimin, LU Junchi, LIU Chong, et al. A novel method of single-terminal fault location for MMC-HVDC transmission system based on virtual line impedance[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2868-2875.
- [18] 国家能源局. 直流输电线路及接地极线路参数测试导则: DL/T 1566—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

#### 作者简介:



张钥朗

张钥朗(1998—), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为高压直流输电接地极线路保护(**E-mail**:cqzyl2016@163.com);

李小鹏(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为高压直流输电线路控制与保护(**E-mail**:lxpbsd@163.com);

卢继平(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:lujiping@cqu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Novel fault location algorithm based on modulus network analysis for grounding electrode line

ZHANG Yuelang<sup>1,2</sup>, LI Xiaopeng<sup>1,3</sup>, LU Jiping<sup>2</sup>, TENG Yufei<sup>1,3</sup>, ZHUANG Yi<sup>4</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China;

4. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221005, China)

**Abstract:** To deal with the low accuracy problem of existing fault location algorithms when the DC grounding electrode line has a long distance and high resistance grounding fault, a novel fault location algorithm for grounding electrode line based on modulus network analysis is proposed. Based on the distributed parameter model of the line, the fault modulus network of the grounding electrode line is established. On this basis, the voltage and current distribution along the line is calculated by using the voltage and current at the measuring end of the grounding electrode line, and then the measurement impedance at the fault point is obtained. The fault location is carried out according to the characteristic that the imaginary part of the measurement impedance at the fault point is the smallest. A large number of simulative results show that the proposed algorithm can achieve accurate location within the full length of grounding electrode line, and is not affected by the fault location and distributed capacitance, and has a high fault location accuracy.

**Key words:** UHVDC power transmission; grounding electrode line; measurement impedance; electric fault location; characteristic harmonics

附录 A

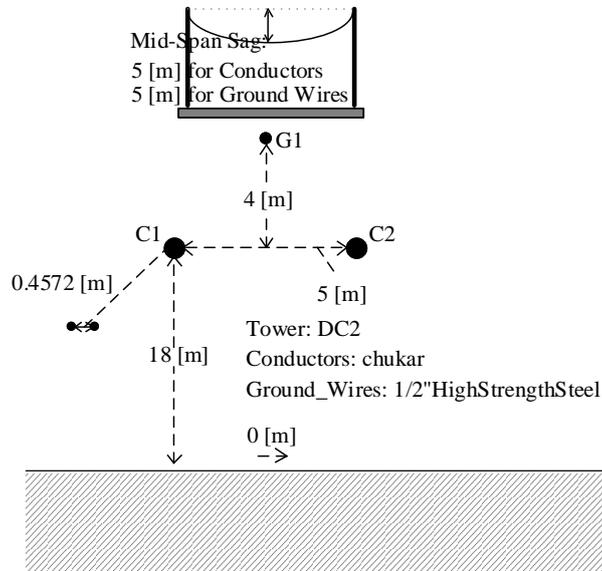
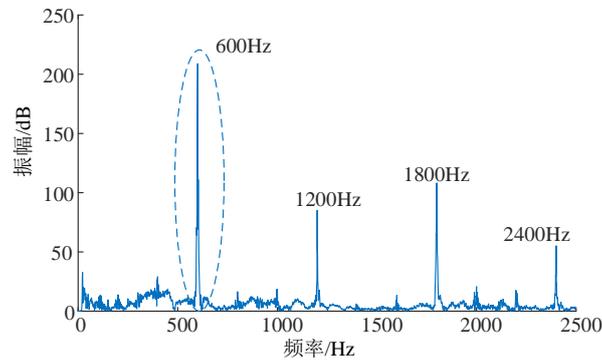
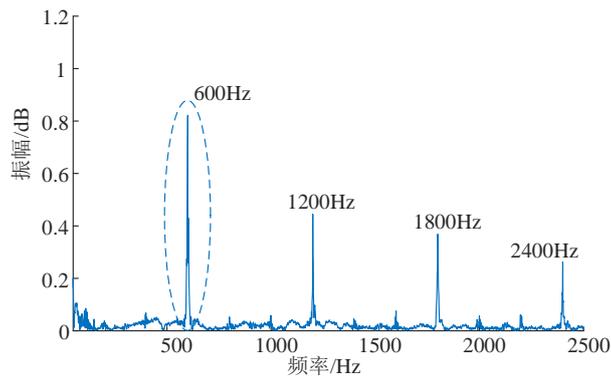


图 A1 接地极线路频变模型

Fig.A1 Frequency-dependent model of grounding electrode line



(a) 电压频谱图



(b) 电流频谱图

图 A2 接地极线路电压、电流频谱图

Fig.A2 Voltage and current spectrum of grounding electrode line

表 A1 双回线故障定位结果

Table A1 Location results of double-lines fault

故障位置/km	过渡电阻/ $\Omega$	定位结果/km	误差/%
15	0	14.959	0.041
	200	14.859	0.139
25	0	24.950	0.049
	200	24.842	0.156
35	0	34.967	0.033
	200	34.834	0.164
45	0	45.084	0.083
	200	45.173	0.171
55	0	55.081	0.081
	200	55.233	0.231
65	0	65.052	0.051
	200	64.803	0.195
75	0	74.891	0.108
	200	75.231	0.228
85	0	85.049	0.049
	200	84.792	0.204
99	0	99.049	0.048
	200	99.184	0.183

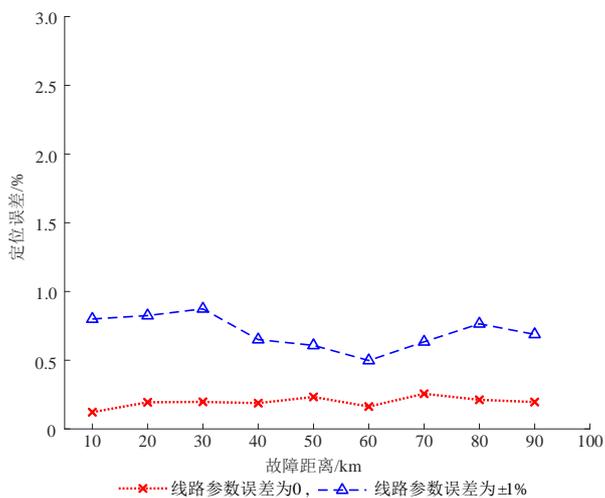


图 A3 线路参数存在±1%误差时的故障定位结果

Fig.A3 Fault location results with ±1% error in line parameters

表 A2 不同采样误差下的定位结果

Table A2 Location results with different sampling errors

故障类型	故障距离/km	电流互感器采样误差		定位误差/%
		幅值误差/%	相位误差/%	
单回线路 接地故障	15	±1	—	0.142
		—	±1	0.164
		±3	—	0.324
		—	±3	0.406
	90	±1	—	0.103
		—	±1	0.138
		±3	—	0.426
		—	±3	0.292
双回线路 接地故障	15	±1	—	0.117
		—	±1	0.142
		±3	—	0.389
		—	±3	0.416
	90	±1	—	0.132
		—	±1	0.108
		±3	—	0.273
		—	±3	0.233

表 A3 不同噪声情况下的仿真结果

Table A3 Simulative results under noise conditions

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/Ω	测距结果误差/%		
			SNR 为 10dB	SNR 为 20dB	SNR 为 30dB
单回线路 接地故障	15	0	0.105	0.108	0.044
		200	0.142	0.111	0.137
	40	0	0.085	0.127	0.159
		200	0.189	0.173	0.137
	80	0	0.122	0.069	0.078
		200	0.181	0.108	0.221
	99	0	0.128	0.086	0.167
		200	0.161	0.176	0.202
双回线路 接地故障	15	0	0.085	0.097	0.048
		200	0.181	0.180	0.145
	40	0	0.192	0.171	0.104
		200	0.263	0.194	0.175
	80	0	0.136	0.069	0.104
		200	0.213	0.244	0.182
	99	0	0.081	0.105	0.134
		200	0.244	0.171	0.202

注：SNR 表示信噪比。