

# 利用测量波阻抗欧几里得距离的柔性直流 输电线路后备保护方案

张大海, 武传健, 和敬涵, 梁晨光, 李猛

(北京交通大学 电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

## Backup Protection Scheme for Flexible DC Transmission Lines by Measuring Wave Impedance Euclidean Distance

ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, LIANG Chenguang, LI Meng

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** The traveling wave main protection is susceptible to the high-resistance faults, the current differential protection to the distributed capacitance, and there is a large time gap between the existing main and backup protection schemes. In order to solve the above problems and further improve the reliability of the protections, this paper proposes a new scheme of traveling wave longitudinal protection based on measuring the wave impedance Euclidean distance. By analyzing the difference between the amplitude and change trend of the measured wave impedance on both sides of the line during the internal and external faults of the flexible DC transmission lines, it is proposed to use dyadic wavelet transform to extract the wideband window to measure the wave impedance, and introduce the Euclidean distance and the similarity coefficient to express the amplitude and change trend of the wave impedance. Finally, the internal and external faults are distinguished according to the Euclidean distance and the similarity coefficient. The PSCAD simulation verifies that the protection principle can identify the internal and external faults reliably, sensitively and quickly, and it has a strong ability to withstand the transition resistance and noise interference.

**KEY WORDS:** flexible DC transmission; traveling wave pilot protection; measuring wave impedance; Euclidean distance

**摘要:** 行波主保护易受高阻故障的影响, 电流差动保护易受分布式电容的影响, 且现有主、后备保护方案之间存在较大时间空白。为解决上述问题, 进一步提高保护的可靠性, 提出一种基于测量波阻抗欧几里得距离的行波纵联保护新方案。通过分析柔性直流输电线路区内、外故障时, 线路两侧测量波阻抗幅值及变化趋势的差异性, 提出利用二进小波变换提取宽频窗测量波阻抗, 并引入欧几里得距离及相似系数

表达波阻抗幅值及变化趋势, 最后根据欧几里得距离和相似系数区分区内、外故障。PSCAD 仿真表明所提保护方案能可靠、灵敏、快速地识别区内、外故障, 并具有较强的耐受过渡电阻和噪声干扰的能力。

**关键词:** 柔性直流输电; 行波纵联保护; 测量波阻抗; 欧几里得距离

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1809

## 0 引言

柔性直流输电技术常应用于新能源并网等项目, 在电网运行中担任着重要的作用。与常规直流技术相比, 柔性直流具有便于组网、无换相失败、有功无功独立控制的优势, 柔性直流电网成为未来发展的重要方向之一<sup>[1-3]</sup>。柔性直流输电线路较直流电缆线路的故障概率大, 且故障电流上升速率大。而模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)造价高且脆弱, 若不能及时切故障线路, 会对柔性直流设备造成巨大损害甚至进一步破坏电网整体的安全性, 所以研究快速切除柔性直流线路的保护方案对提高电网的可靠性具有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。

实际工程中常采用行波保护作为柔性直流输电线路中的主保护, 其基本原理是利用行波电压或电流的突变量或者变化量作为故障识别特征值, 一般可以在几毫秒内识别故障<sup>[6]</sup>。但高阻故障是影响行波保护可靠性的重要问题, 实际工程中已发生多次因高阻故障接地, 行波保护拒动的情况<sup>[7]</sup>。为保证柔性直流工程的安全性, 亟需研究安全可靠的柔性直流线路后备保护方案。电流差动保护常常作为后备保护解决高阻故障的问题, 但由于其受分布式电容的影响而动作时间较长, 常常无法及时清除故

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600)。

Project Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900600).

障,甚至导致换流器闭锁<sup>[8]</sup>。文献[9]提出基于差动电流频率特性的保护原理,但其频率特性与线路长度、故障距离相关。长输电线路时故障判据的可靠性需要深入分析。文献[10]利用小波变换提取高频暂态电压分量,利用限流电抗器的高频阻碍作用设计故障识别判据。暂态电压信号易受故障电阻和线路衰减的影响导致故障判据的可靠性降低。文献[11-12]以补充分布电容为目的提出了基于时域的后备保护方案,理论上解决了分布电容电流的影响问题。但其应用复杂,整定困难。文献[13]利用故障电流的波形相似度构造故障识别判据。但其本质只关注故障电流变化趋势,而忽略了各干扰因素的影响。各因素干扰较强时,保护原理的可靠性将受到挑战。

上述保护原理所选特征值依然受故障电阻和噪声干扰等因素的影响。波阻抗不受上述因素影响,可作为特征值构造保护判据。文献[14]利用母线与各支线测量波阻抗的极性不同区分母线的区内、外故障,其应用在交流母线保护中。文献[15]提出一种基于S变换的波阻抗方向继电器。文献[16]提出一种基于S变换的初始行波相位比较式方向继电器,这两种方向继电器采用单一频率进行计算,且均适应于交流线路。针对高压直流输电线路,文献[17]利用测量波阻抗的幅值进行故障识别,其正向故障时波阻抗为直流滤波器和平波电抗的并联阻抗,若直流滤波器退出运行后,测量波阻抗的幅值会发生变化,进而可能导致保护误动作。针对此问题,文献[18]利用特殊频率段测量波阻抗的相位提出了新的保护原理解决直流滤波器退出运行的问题。由于柔性直流输电工程中只存在限流电抗器,上述方案难以应用于柔性直流保护中,文献[19]分析行波信号经过感性终端时发生正全反射,利用测量波阻抗的幅值以及引入电压启动判据提出了一种基于单端波阻抗的保护原理作为柔性直流线路的主保护。上述文献多利用单一频率的幅值构造故障识别判据,未能解析柔性直流线路测量波阻抗的总体变化趋势,其可靠性有待增强。另外,柔性直流输电线路需要绝对的选择性和抗干扰能力,基于双端量的保护原理更为合适。因此,柔性直流输电线路亟需寻求不受分布电容、故障电阻和噪声干扰的纵联保护方案。

本文在上述文献的基础上解析了行波信号经过感性终端时,区内、外故障测量等效波阻抗的幅值影响因素及整体变化趋势。通过小波变换提取多频率段的测量波阻抗,利用测量波阻抗的变化趋势

以及幅值差异构造了具备普适性的行波纵联保护方案。仿真结果表明,所提保护方案不受分布电容电流的影响,具备强大的耐受故障电阻和噪声干扰的能力。

## 1 感性终端下反射系数及测量波阻抗特性

### 1.1 反射系数

柔性直流输电工程线路两端安装限流电抗器以限制故障电流的变化速率,但电感终端可能对行波信号特征产生较大影响<sup>[19]</sup>。为简化分析,本文将直流线路故障回路进行简化得到图1,设置F<sub>1</sub>处发生故障并进行分析。

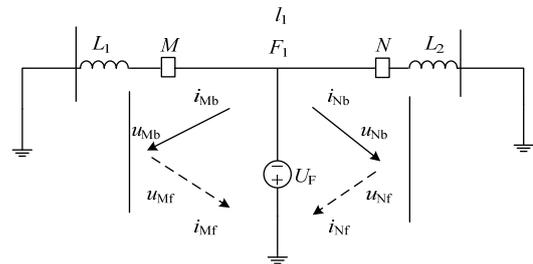


图1 输电线路终端电感电路

Fig. 1 Transmission line with inductance

图中： $U_F$ 为故障点叠加故障电压源； $L_1$ 和 $L_2$ 为线路两端限流电抗器。发生故障时初始行波向两侧传输。线路测量点M和N处得到反行波 $u_{Mb}$ 、 $i_{Mb}$ 、 $u_{Nb}$ 、 $i_{Nb}$ 和前行波 $u_{Mf}$ 、 $i_{Mf}$ 、 $u_{Nf}$ 、 $i_{Nf}$ 。定义 $Z(t)$ 为末端负载对时变电压呈现的时变阻抗,则电压反射系数为

$$\rho = \frac{Z(t) - Z_C}{Z(t) + Z_C} \quad (1)$$

式中： $Z_C$ 为线路波阻抗,由线路电感和电容决定。当终端系统存在电感元件时,时变阻抗 $Z(t)$ 和入射波相关。行波信号为时变函数,则 $Z(t)$ 为时变函数,反射系数亦随时间变化。假设为无损导线时,反射系数 $\rho$ 的时域表达式<sup>[20]</sup>为

$$\rho = 2e^{-(t-t_0)/(L/Z_C)} - 1 \quad (2)$$

式中： $L$ 为终端电感值,公式(2)可验证反射系数随时间变化。

从物理意义方面分析:当行波信号通过串联电感时,由于线圈中磁能无法突变,电感电流突变量初始瞬间为零,随后逐渐增大。另外波作用到电感的初瞬间相当于波到达线路开路末端,反射波在此瞬间使电感首端电压上升至2倍,随后反射电压逐渐下降至稳定值。故波信号到达限流电抗器瞬间为全反射,反射系数为1;随后电流增大和电压减小,反射系数不再为1。

由于行波信号速度快、检测要求高,基于瞬时故障信息的保护方案可能因未及时捕捉到故障信

息而失效，影响系统的安全运行。为充分利用测量波阻抗的信息，进一步增强保护的可靠性，本文针对初始行波阶段的测量波阻抗故障特性进行分析。

### 1.2 故障电阻对波阻抗的影响分析

波阻抗为行波电压与行波电流的比值。当距离首端  $x$  km 发生故障时，电压和电流行波之间满足公式(3)。

$$\begin{cases} i_f(t) = u_f(t) / Z_c \\ i_r(t) = -u_r(t) / Z_c \end{cases} \quad (3)$$

式中： $u_f$ 、 $i_f$ 和  $u_r$ 、 $i_r$  分别代表前行波和反行波电压、电流； $Z_c$  为波阻抗。对于对称双极系统，正极接地故障和双极短路故障的附加网络如图 2 所示。

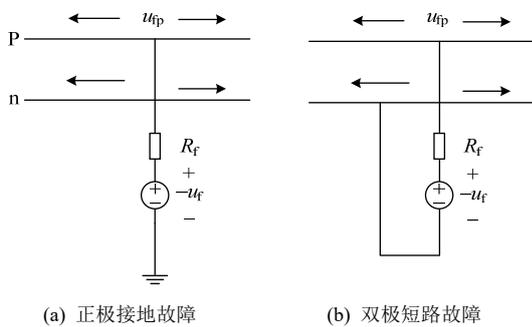


图 2 故障附加网络

Fig. 2 Fault superimposed network

图中： $p$  和  $n$  分别表示正极和负极； $R_f$  代表故障电阻。本文以  $U_{dc}$  表示正极对地电压，则图 2(a) 中的  $U_f=U_{dc}$ ，图 2(b) 的  $U_f=2U_{dc}$ 。通过极模变换<sup>[20]</sup> 可得线模和零模分量为

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_p \\ u_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中： $u_p$  和  $u_n$  代表极信号； $u_1$  和  $u_0$  代表线模量和零模量。根据图 2、公式(3)和(4)可以求解出正极接地故障和双极接地故障的初始行波表达式为

$$\begin{cases} u_{f1} = \begin{cases} -\frac{\sqrt{2}Z_{c1}U_{dc}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} & \text{单极接地} \\ -\frac{\sqrt{2}Z_{c1}U_{dc}}{Z_{c1} + 4R_f} & \text{双极短路} \end{cases} \\ i_{f1} = \begin{cases} -\frac{\sqrt{2}U_{dc}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} & \text{单极接地} \\ -\frac{\sqrt{2}Z_{c1}U_{dc}}{Z_{c1} + 4R_f} & \text{双极短路} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $u_{f1}$  和  $i_{f1}$  代表行波电压、电流的线模分量。零模分量只需将分子中  $Z_{c1}$  换为  $Z_{c0}$  即可。初始行波电压  $u_{f1}$  与行波电流  $i_{f1}$  的比值为波阻抗，由式(5)可以看出，故障电阻  $R_f$  被约去。因此，波阻抗和故障电阻不存在联系，其完全不受故障电阻的影响。

### 1.3 区内、外故障时测量波阻抗

假设图 1 中  $F_1$  发生故障，设故障瞬间  $t=0$  时，故障行波由  $F_1$  处向母线传播。行波信号经过折反射后第二次达到母线的时刻为  $t_1$ ，则在  $(0, t_1)$  时间内的行波信号为初始行波。初始行波信号的分析依据彼得逊法则<sup>[15]</sup>，分析  $M$  侧的正向和反向故障得到彼得逊等效电路图 3。图中： $Z_c$  为线路波阻抗； $Z_{c1}$  为母线系统对地杂散电容等值阻抗； $Z_{c2}$  为限流电抗器等值阻抗； $U'$  和  $I'$  分别为初始行波电压、初始行波电流。

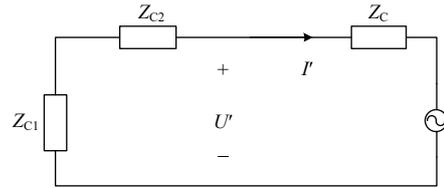


图 3 彼得逊等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit based on Peterson principle

1) 根据图 3 等效回路，发生正向故障时存在：

$$Z_{bc1} = -\frac{U'}{I'} = Z_{c1} + Z_{c2} \quad (6)$$

式中： $Z_{bc1}$  为线路正向故障时  $M$  点测量波阻抗。其值为  $M$  点背侧等效阻抗(限流电抗器与母线系统对地电容等效阻抗的串联值)。

2) 根据图 3 等效回路，测量点  $M$  背侧发生反向故障时存在：

$$Z_c = \frac{U'}{I'} \quad (7)$$

由式(7)可知  $M$  点的测量波阻抗为线路波阻抗。由于线路两端参数相同，故以  $N$  侧为基准分析正、反向故障时，结论与上述分析相同，本文不再赘述。由上述分析可以得出结论：当测量点  $M$  侧或  $N$  侧发生正向故障时，即发生区内故障时，两侧测量波阻抗均为测量点背侧等效阻抗；当测量点  $M$  侧或  $N$  侧发生反向故障时，即发生区外故障时，靠近故障侧的测量波阻抗为线路波阻抗，另一侧的测量波阻抗为测量点背侧等效阻抗。

## 2 保护原理

本节首先理论分析了测量波阻抗(包括线路波阻抗和测量点背侧等效阻抗)幅值及变化趋势。随后，以张北柔直系统的参数为例验证了上述理论分析。最后，总结两端测量波阻抗的差异性，据此提出纵联行波保护方案并进行了普适性分析。

### 2.1 测量波阻抗幅值及变化趋势理论分析

1) 线路波阻抗幅值及变化趋势。

输电线路波阻抗由线路参数决定，其计算公式为

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_m + j\omega L_m}{G_m + j\omega C_m}} \quad (8)$$

式中： $R_m$ 、 $L_m$ 、 $G_m$ 和 $C_m$ 分别为单位长度的模量电阻、电感、电导和电容。针对较长输电线路，忽略电阻和电导的情况下，波阻抗由电感和电容决定。由于导线电感由内部电感和外部电感组成，当频率升高时导线的内部电感减小至稳定值，外部电感不变，故总电感减小至稳定值。因此，式(8)中频率升高时，电感减小导致测量波阻抗减小至稳定值。另外，由于电感随频率的变化非常小，因此测量波阻抗的幅值变化不大。一般认为架空线的测量波阻抗为200~400Ω<sup>[19]</sup>。

2) 背侧等效阻抗幅值及变化趋势。

幅值：背侧等效阻抗包括限流电抗器及母线系统的等效阻抗。其中母线系统的等效阻抗为

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (9)$$

式中： $X_c$ 为容抗值； $f$ 为频率； $C$ 为电容值。限流电抗器的等效阻抗为

$$X_L = 2\pi f L \quad (10)$$

式中： $X_L$ 为容抗值； $f$ 为频率； $L$ 为电容值。

显然，母线系统等效阻抗的幅值和频率呈现反比关系。限流电抗器等效阻抗的幅值和频率呈正比关系。因此，式(9)和(10)可计算不同频率时背侧等效阻抗的幅值。

变化趋势：由1.1节分析可知，反射系数在初始行波阶段由1逐渐下降至稳定值。发生区内故障时，线路两侧的测量波阻抗有：

$$|Z_{bc}| = \frac{1+\rho}{1-\rho} Z_c \quad (11)$$

测量波阻抗绝对值 $|Z_{bc}|$ 同反射系数 $\rho$ 存在直接关系，当反射系数由1降为稳定值时，测量波阻抗的绝对值由最大降低为稳定值。

综上，区内故障时两端测量波阻抗等于母线系统和限流电抗器的等效阻抗。并且其随故障的发生由最大值降为稳定值。区外故障时，近故障点端测量波阻抗为线路波阻抗且幅值固定不变；远故障点端测量波阻抗为母线系统和限流电抗器的等效阻抗，幅值变化趋势为下降，且下降至稳定值。

2.2 张北柔直系统测量波阻抗分析

1) 张北柔直线路波阻抗。

已知导线尺寸、杆塔结构等参数即可计算线路的相模频变参数。本文根据张北柔性直流工程的模型分析线路波阻抗频率特性，其中杆塔参数如表1和图4所示。

线型	参数	数值及单位
导线	导线半径	0.020 345 4m
	直流电阻	0.032 06Ω/km
地线	地线半径	0.005 524 5m
	直流电阻	2.8645Ω/km
	地电阻率	100 Ω·m

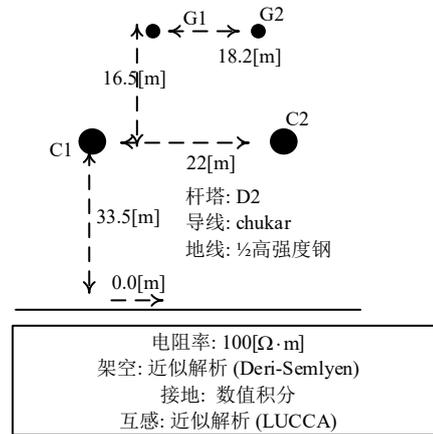


图4 直流线路杆塔  
Fig. 4 Tower of DC transmission line

表2为张北柔性直流输电线路波阻抗的幅频特性。线路波阻抗在大于一定频率时为常数，并且线模波阻抗较零模波阻抗更快趋于稳定，因此本文选取线模波阻抗作为特征值。

阻抗类型	频率/Hz	阻抗值/Ω
线模波阻抗	0.01	798.5
	1	312.4
	100	256.7
	10 000	255.1
	1 000 000	254.5
地模波阻抗	0.01	803.1
	1	782.8
	100	650.8
	10 000	512.5
	1 000 000	455.3

2) 张北柔直背侧等效阻抗。

母线系统：对于直流线路，母线系统包括输电线路、变压器、互感器、阻波器等多种元件<sup>[21-22]</sup>。500kV母线系统对地等值电容可分为两种情况：

①母线本身对地阻抗具有频变特性，根据文献<sup>[21]</sup>分析，母线对地电容在62~70kHz以下时为7~11pF/m，100m内的母线对地杂散电容最大为1100pF。

②母线连接设备对地电容情况为：变压器等效电容6000pF；断路器等效电容最大为120pF；避雷器对地电容为100pF；电压互感器对地电容为

5000pF; 电流互感器对地电容最大为 100pF。

综上, 母线系统对地杂散电容范围为 6000pF~0.1μF。假设采样频率为 10kHz, 根据式(9)电容值最大时其容抗值最小为 160Ω。

限流电抗器: 张北柔性直流工程的限流电抗器值为 150mH。若采样频率为 10kHz, 150mH 的限流电抗器的等效阻抗为 9420Ω。

将母线系统杂散电容与限流电抗器的等效阻抗值与频率的关系列于表 3 中。

表 3 母线系统及限流电抗器等效阻抗值  
Table 3 Equivalent impedance value of bus system and current limiting reactor

频率/kHz	等效阻抗值/Ω				
	6000pF	100 000pF	10mH	100mH	150mH
1	26525	1600	62.8	628	942
5	5305	320	314	3140	4710
10	2652	160	628	6280	9420

### 2.3 保护方案及普适性分析

传统保护缺点分析。上述分析可知, 区内故障时, 线路两侧测量波阻抗为测量点背侧等效阻抗; 区外故障时, 近端测量点测量波阻抗为线路波阻抗, 远端测量波阻抗为测量点背侧阻抗, 且测量点背侧等效阻抗为母线系统与限流电抗器等效阻抗相加。由表 3 知, 频率升高时限流电抗器等效阻抗增大, 而母线系统等效阻抗减小。因此, 不同频率、不同时间的测量阻抗不同。此前保护方案多采用固定测量时刻、固定频率测量阻抗的幅值方法识别故障。虽然计算量较小, 但此类保护方案缺乏普适性, 动作值受到系统参数的影响; 单一频率的故障信息保证了速动性, 但降低了保护的可靠性。由于后备保护对可靠性要求较高, 对时间要求相对主保护较低, 所以本文拟采用多频段的测量波阻抗构造纵联行波保护。

保护方案。2.1 节、2.2 节分析可以总结: 发生区内故障时, 线路两侧测量阻抗变化趋势一致, 测量阻抗由到达限流电抗器瞬间的最大值减小至稳定值; 而区外故障时, 近端测量阻抗变化趋势与上述相同, 远端测量阻抗为线路波阻抗, 幅值稳定不发生变化。因此, 本文利用区内、外故障时, 线路两侧测量波阻抗的幅值和变化趋势的差异性构造纵联行波保护方案。

所提保护方案普适性分析。上述保护方案分别利用了测量波阻抗的幅值及变化趋势的特性。由式(8)可知变化趋势与反射系数相关, 故所有存在限流电抗器的柔性直流输电系统均满足此变化趋势。而幅值与线路参数、母线系统和限流电抗器相关。

由表 3 可知, 即使限流电抗器为 10mH, 母线系统和限流电抗器的等效阻抗依然远远大于 400Ω。因此, 上述测量波阻抗的幅值差异在柔性直流系统均存在。综上, 上述纵联行波保护方案适用于两端含限流电抗器的柔性直流输电系统。

## 3 基于测量波阻抗的行波纵联保护

### 3.1 欧几里得距离

在数学中, 欧几里得距离是欧几里得空间中两点之间的距离。使用这个距离, 欧氏空间成为了度量空间。欧几里得距离用来描述两样本之间的空间差距, 距离值越大代表样本数值差距越大, 样本越不相似; 距离越小代表样本相似程度越高<sup>[23]</sup>。欧几里得的二维空间公式为

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (12)$$

式中:  $d$  表示点 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 之间的欧几里得距离。由于各维分量的分布不一样, 为了消除单位的影响, 本文选择标准化欧几里得距离。首先将各个分量都进行标准化。公式为

$$x^* = (x_i - \bar{x}) / x_\sigma \quad (13)$$

式中:  $x^*$ 为 $x_i, y_i$ 标准化后的值;  $x_i$ 为标准化前的值;  $\bar{x}$ 为分量的均值;  $x_\sigma$ 为分量的标准差。 $y^*$ 的计算类似。将标准化后的值代入公式(12)得到标准化欧几里得距离的公式为

$$d = \sqrt{(x_2^* - x_1^*)^2 + (y_2^* - y_1^*)^2} \quad (14)$$

若欧几里得距离在整个初始行波阶段数值相同且较小, 则代表着两个样本之间存在着相似关系, 即两个样本之间的变化趋势相同。因此, 本文选用欧几里得距离表示两侧波阻抗的相似程度和幅值差异。由于欧几里得距离数值较大, 为了更好的对比测量波阻抗间的趋势变化, 本文选用公式(15)将欧几里得距离转化为相似系数。式(15)中  $r$  代表相似系数, 欧几里得距离越大, 相似系数越小, 则样本相似程度越低。由前面分析可知, 区外故障时两侧测量波阻抗相差在几千Ω, 此时相似系数非常小。为详细描述相似系数, 本文将距离缩减至原距离的 1/1000, 此时未改变相似系数的意义。即: 欧几里得距离越大, 相似系数越小。

$$r = \frac{1}{1 + d/1000} \quad (15)$$

### 3.2 小波变换计算波阻抗

二阶小波对尺度参量离散化, 具有时移共变性。二阶小波变换的模极大值常被用来检测信号的奇异性, 模极大值的定义为

$$|W_{\varphi}f(s, x)| \leq |W_{\varphi}f(s, x_0)| \quad (16)$$

式中： $W_{\varphi}f(s, x)$ 代表信号的小波变换，称 $x_0$ 为小波变换的模极大值点； $|W_{\varphi}f(s, x_0)|$ 称为小波变换的模极大值<sup>[24]</sup>。本文利用基于3阶B样条函数的小波变换对故障电流、电压信号进行分析，提取合适频率的行波信号计算波阻抗。

### 3.3 故障识别判据及流程图

由上述分析可知，本文采取欧几里得距离判断线路两侧的测量波阻抗的相似性和幅值差异。将测量波阻抗数据代入 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ ，经过公式(9)标准化后代入公式(14)(15)求得欧几里得距离和相似系数。根据上述分析，本文故障识别判据为

$$\begin{cases} \text{区内故障：} r > r_{\text{set}} \\ \text{区外故障：} r \leq r_{\text{set}} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $r$ 为线路两侧测量波阻抗的相似系数； $r_{\text{set}}$ 为相似系数整定值。对于两侧相关系数的分析应考虑噪声、通信延时和电流互感器误差等因素的影响。在实际工程中，电流互感器受环境等因素的影响会对测量信号带来一定的误差，假设电流互感器达到正常运行状态时的最大误差10%<sup>[9]</sup>。由于本文研究输电线路为200km架空线路，其通信延时和噪声干扰不可忽略。若采用光纤通道，200km线路的通信延时在1ms左右。因此，本文综合考虑通信同步误差、计算误差等因素设置阈值为0.9。由表2可知，限流电抗器等效阻抗远远大于波阻抗值，故相似系数为0.9，即测量阻抗幅值相差250Ω可以满足区分波阻抗与限流电抗器等值阻抗的要求。

图5为故障识别的流程图。故障识别的步骤为：  
1) 采集极电压、极电流信号，利用故障分量

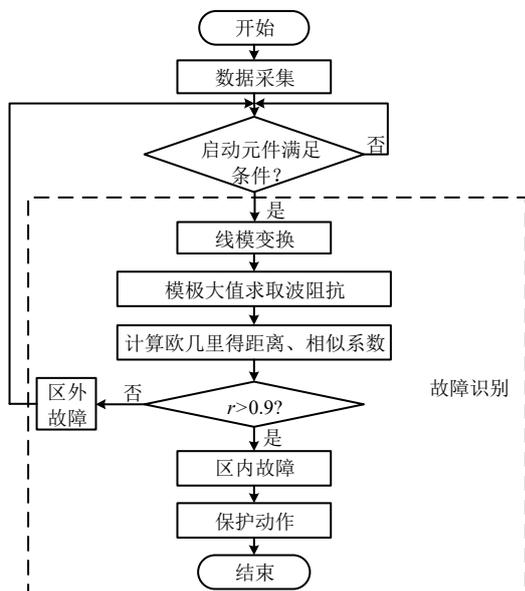


图5 保护流程图

Fig. 5 Protection flow chart

进行线模变换得到线模电压、线模电流。

2) 对线模电压、线模电流进行小波变换，利用模极大值求取初始行波测量波阻抗。

3) 求取两侧测量波阻抗的欧几里得距离，并转化为相似系数。若相似系数大于0.9则为区内故障，否则为区外故障。

### 3.4 保护时间分析

柔性直流输电系统要求主保护动作时间在6ms内，其中断路器动作时间为3ms。而作为主保护的补充和配合，后备保护动作时间应少于20~30ms<sup>[5]</sup>。

本文选取2ms的数据窗，故欧几里得距离的计算时间( $t_1$ )为2ms。此外，由于计算公式涉及统计分析，因此需考虑计算时间。微机保护设备通常使用数字信号处理(DSP)来处理数据。以TMS320F2812为例，由于系统时钟为150MHz，因此其周期为6.67ns。欧几里得距离的计算公式可以看出其计算次数不超过10000，故DSP的计算时间不超过6.7μs。TMS320F2812的转换时间由输入时钟和采样周期决定且不超过1μs。考虑其他配置时间，DSP的计算时间为 $t_2=0.5ms$ 。

此外，考虑其他时间因素，例如光电转换延迟和测量延迟。因为上述因素都在μs级，设置 $t_3=0.1ms$ 作为总的延时。最后，通信延迟是计算差动保护时间必不可少的部分。许多因素如传输媒体、数字设备、转换器等都会产生通信延迟。因此，定义通信延迟( $t_d$ )为

$$t_d = t_e + t_p + t_r n + t_0 \quad (18)$$

式中： $t_e$ 是设备的传输延迟，它与设备和传输速度等级有关，其时间不超过0.1ms。 $t_p$ 是终端设备的延迟，包括脉冲编码调制多路复用器和连接电路导致的延迟。脉冲编码调制端子产生的延迟约为600μs，考虑其他因素的延迟设置 $t_p=1ms$ 。 $t_r$ 是多路复用器的延迟，其值为0.1ms。 $n$ 是光区间数。 $t_0$ 是信号的传输延迟，其值为4.9μs/km。由于图6模型中的最长线不超过250km，因此设置 $t_0=1.225ms$ 。通信延迟的总时间为： $t_d < 0.1 + 1 + 0.5 + 1.225 = 2.825ms$ 。

综上，所提保护方案的最大动作时间为： $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_d = 5.425ms$ 。

### 3.5 耐故障电阻理论分析

所提保护方案从以下两个方面提高了耐受故障电阻的能力：

1) 传统行波保护方案以电压或电流微分、变化量为特征值。故障电阻增大时电压、电流幅值受到影响，可能出现特征值难以达到阈值的情况，进而导致保护失效<sup>[5]</sup>。1.2节分析可知，计算波阻抗时

故障电阻被消去,因此波阻抗完全不受故障电阻的影响。本文所提保护方案利用波阻抗作为特征值保证了其不受故障电阻的影响。

2) 此外,本文所提保护方案利用波阻抗的欧几里得距离构造故障识别判据。将测量波阻抗代入式(14)可得

$$d = \sqrt{(t_2^* - t_1^*)^2 + (Z_{bc2} - Z_{bc1})^2} \quad (19)$$

显然,经过标准化后欧几里得距离只与测量波阻抗的幅值相关。测量波阻抗幅值不受故障电阻影响,因此欧几里得距离不受故障电阻的影响。综上,波阻抗特征值的选择及欧几里得距离的特性使得所提保护方案具备较强的耐受故障电阻的能力。

### 3.6 耐噪声干扰理论分析

所提保护方案从以下两个方面提高了耐受故障电阻的能力:

1) 本文采用小波变换的模极大值计算波阻抗,而模极大值法具备去噪能力。具体分析如下。

李氏指数<sup>[25-26]</sup>表征突变点的奇异性大小,设函数在 $t_0$ 附近具有下述特征:

$$|f(t_0 + h) - P^n(t_0 + h)| \leq A|h|^\alpha \quad (20)$$

称 $f(t)$ 在 $t_0$ 处的李氏指数为 $\alpha$ 。 $\alpha$ 越大表示该点的光滑度越大。模极大值随分解尺度的变化由李氏指数决定。假设 $f(t)$ 的小波满足

$$\begin{cases} |W_\alpha f(t)| \leq Aa^\alpha, t \in [a, b] \\ |\log_2 |W_{2^j} f(t)| \leq \log_2 A + j\alpha \end{cases} \quad (21)$$

式中: $A$ 代表常数。显然, $\alpha > 0$ 时,小波变换的极大值随分解尺度 $j$ 的增大而增大; $\alpha < 0$ 时,小波变换的极大值随分解尺度 $j$ 的增大而减小。而白噪声的李氏指数 $\alpha \approx -1/2$ <sup>[26]</sup>,且噪声的小波系数为模极大值。所以,噪声随分解尺度 $j$ 的增大而减小。

综上,信号随着分解尺度的增大而增大,而噪声随着分解尺度的增大而减小。白噪声在小波变换的分解重构中被滤除,且此过程不影响模极大值的提取。

2) 高斯噪声服从正态分布,噪声的概率密度函数为

$$P_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\nu_1)^2}{2\sigma^2}} \quad (22)$$

式中: $\sigma$ 代表标准差; $\nu_1$ 代表数学期望。噪声的加入使得波形出现偏离期望值的数据,其相当于异常数据。本文计算欧几里得距离之前对数据进行标准化处理。将式(13)代入式(14)可得

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left( \frac{X_{2k} - X_{1k}}{x_\sigma} \right)^2} \quad (23)$$

式中: $X_{2k}$ 、 $X_{1k}$ 代表2组数据。若将方差的倒数 $\frac{1}{x_\sigma^2}$

看为一个权重,则上式为加权欧几里得距离。其在不同时刻的数据加不同的权重,则方差 $x_\sigma^2$ 越大,信号平滑度越高。式(23)计算时采用递推法计算各值,使得其类似加权递推平均滤波器具备去除异常数据的能力。给的权重越大,去异常数据能力越强。因此,式(23)所示加权欧几里得算法具备去噪能力。

综上,小波变换和欧几里得算法使得所提保护方案具备较强耐受噪声干扰的能力。

### 3.7 优越性分析

利用相似度的保护方案已有较多应用,如:文献[13]利用故障电流的相似性构造纵联保护方案。相较已有保护方案,本文所提保护方案具备以下特点:

1) 已有基于相似性的保护方案利用两端故障电流或者电流行波的波形相似度进行故障识别。然而,故障电阻依然影响电流等特征值的幅值,进而影响保护的可靠性。本文将波阻抗作为特征值,其幅值理论上完全不受故障电阻的影响。因此,所提保护方案可靠性更高。

2) 已有基于相似性的保护方案本质上只关注方向相似性,忽略了各干扰因素对其幅值的影响。因此,当故障电阻、噪声等因素对幅值影响较大且不可忽略时,已有保护方案的可靠性将难以保证。本文所提保护方案具备波阻抗特征值、模极大值去噪、欧几里得算法的多重保障,消去了故障电阻、噪声等因素的影响。因此,所提保护方案抗干扰能力更强。

综上,所提保护方案理论上具备更强的耐受故障电阻、噪声干扰的能力,且不受分布电容的影响。

## 4 仿真实验

本文根据PSCAD仿真平台建立张北四端柔直工程模型,其中线路采用依频模型如图6所示,详细参数如附录A表A1所示。在 $f_1$ 和 $f_3$ 处分别设置区内、区外故障,故障类型包括金属性接地和经电阻接地,线路Line1两侧分别设置测量点进行数据采集。故障时刻为1.5s,持续0.5s;保护采样频率为20kHz;采集故障后2ms的数据进行计算。

经过多次仿真,本文选取小波变换后的第三层频率带(1.25~2.5kHz)的信号求取测量波阻抗值。另外,由表3表明母线系统等效阻抗相比于限流电抗器值较小,频率越大其所占比例越小。考虑母线系统的复杂性,本文在仿真中忽略母线系统等效阻抗,只计算限流电抗器等效阻抗。

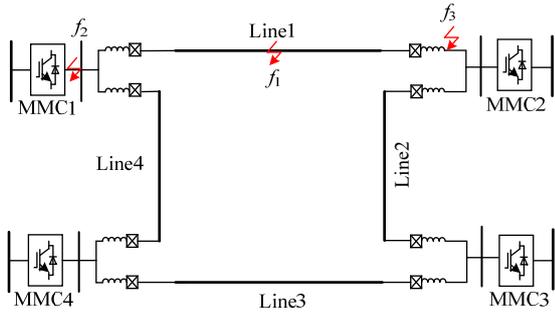


图 6 张北柔性直流工程拓扑

Fig. 6 Topology diagram of Zhangbei flexible DC project

4.1 区内故障

以图 6 中的  $f_1$  故障为例，在线路中点设置过渡电阻为  $0\Omega$  的双极短路故障，仿真结果如图 7 所示。图 7(a)、7(b) 分别代表线路左右侧测量波阻抗，区内故障时，线路两侧的测量阻抗幅值相等，变化趋势一致，因此得到测量波阻抗的相似系数为图 7(c)。图 7(c) 中相似系数凸起的原因因为两侧波阻抗数值并不完全相同。根据公式(15)可以判断此时发生的是区内故障，判断结果与仿真一致，证明保护方案可以在区内故障正确动作。

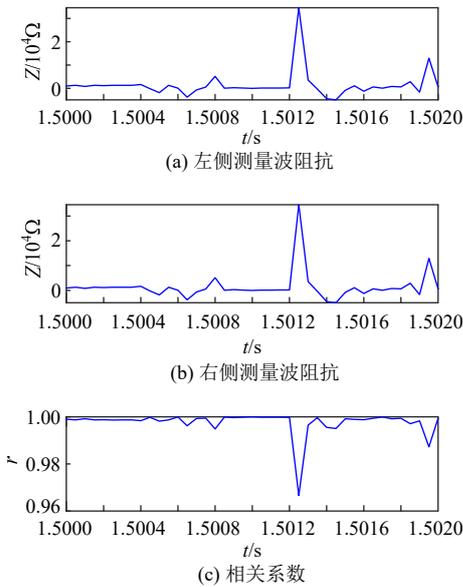


图 7 区内双极短路故障仿真结果

Fig. 7 Simulation results of internal bipolar short-circuit fault

4.2 区外故障

以图 6 的  $f_2$  故障为例，设置区外双极短路故障，过渡电阻为  $0\Omega$ ，仿真结果如图 8 所示。对比图 8(a) 和图 8(b) 可以看出，左侧的测量阻抗幅值远远小于右侧测量阻抗。由于行波传输需要时间，M 侧测量阻抗的行波波头比 N 侧测量阻抗的波头更早出现。另外所求测量阻抗为  $1.25\sim 2.5\text{kHz}$  内所有波阻抗相加，故测量波阻抗为许多线路波阻抗幅值的组合。虽然线路两侧测量波阻的测量时间不同，但标准化

欧几里得定理可以消除维度不同带来的差异，所以看到图 8(c) 中的相似系数远远小于 0.9，代表着两侧波阻抗幅值相差非常大，故判定发生区外故障。

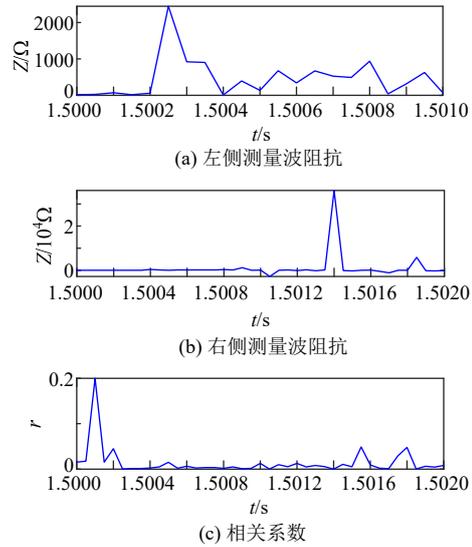


图 8 区外双极短路故障仿真结果

Fig. 8 Simulation results of external bipolar short-circuit fault

4.3 故障电阻和故障距离的影响

为全面验证所提保护方案的耐过渡电阻能力，本文分别在保护区内设置双极短路、单极接地短路故障，过渡电阻由  $0\sim 800\Omega$ ，故障位置距离 MMC1 侧测量点分别为 10、100、190km。在 MMC1 侧测量点左侧近端和 MMC2 侧测量点右侧近端设置区外故障，过渡电阻分别为 0、400 和  $800\Omega$ 。由于张北柔直系统为双极系统，正极和负极对称运行，故只做了正极接地测试，测试结果如表 4—5 所示。

表 4 区内故障条件仿真结果

Table 4 Simulation results of different fault conditions of internal fault

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/ $\Omega$	相似系数
双极	10	0	0.917~1
		400	0.919~1
		800	0.921~1
	100	0	0.961~1
		400	0.959~1
		800	0.960~1
	190	0	0.943~1
		400	0.947~1
		800	0.937~1
正极	10	0	0.931~1
		400	0.937~1
		800	0.926~1
	100	0	0.958~1
		400	0.955~1
		800	0.956~1
	190	0	0.951~1
		400	0.946~1
		800	0.944~1

故障类型	故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	相似系数
双极	MMC1 近端	0	0~0.027
		400	0~0.019
		800	0~0.019
	MMC2 近端	0	0~0.025
		400	0~0.026
		800	0~0.026

仿真结果表明故障位置和过渡电阻不影响保护方案的正确判断,所提保护方案可以耐受较强的过渡电阻。理论上,保护方案只比较两端测量波阻抗的欧几里得距离和变化趋势,而过渡电阻的大小不会改变上述条件,即不会影响两侧波阻抗的相似系数。另外,故障位置与换流阀的距离改变会影响波头到达时间,但时间轴信息会被公式(13)标准化,所以并不会对相似系数造成过大的影响。综上,所提保护方案具有较强的耐受过渡电阻能力。

#### 4.4 不同限流电抗器的影响

现有工程常采用 100mH 的限流电抗器配置于线路两端<sup>[22]</sup>,根据公式(10)和表 3 可计算出任何电感的等效阻抗。为验证不同限流电抗器对保护的影响,本文分别设置 100~200mH 的限流电抗器进行仿真,设置故障类型为区内双极短路故障,故障距离为 100km,过渡电阻为 400 $\Omega$ 。仿真结果如图 9 所示。

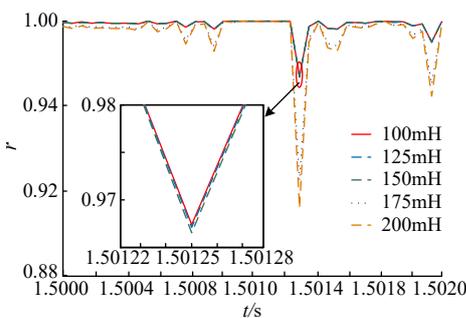


图9 不同限流电抗器的相关系数

Fig. 9 Correlation coefficients of different current limiting reactor

图9的仿真结果中不同限流电抗器的情况下得到的相关系数均小于 0.9,代表两侧测量波阻抗的欧几里得距离非常小,保护判据可以正确判断故障类型。实际上,由于线路两端采用相同的限流电抗器,所以两侧限流电抗器的等效阻抗相同,其欧几里得距离理论上为零,即限流电抗器的大小并不影响保护方案的正确性。

#### 4.5 噪声影响分析

行波信号和噪声在小波变换中变化不同,随着

尺度的增大,行波信号的模极大值增大(阶跃信号的模极大值不变),而噪声信号的模极大值减小。因此选择合适的尺度可以在不影响行波模极大值的情况下减小噪声的影响。本文经过多次仿真选择第三层频率带(1.25~2.5kHz)进行波阻抗的计算。为验证保护方案对噪声的耐受能力,本文对电压、电流信号分别加入信噪比 10~50dB 的噪声,仿真结果如图 10 所示。图 10 中所有的相关系数均满足判据,因此所提保护方案具有较强的抗噪声干扰的能力。

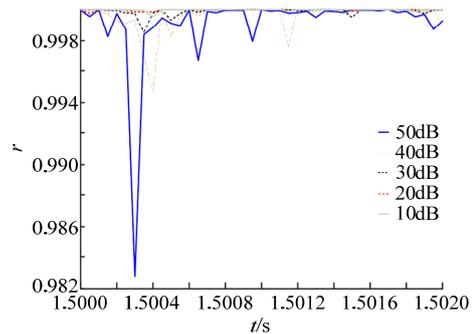


图10 区内故障仿真结果(含噪声)

Fig. 10 Simulation results of internal faults (noise)

#### 4.6 抗干扰性能对比

1.2 节、3.5 节、3.6 节的理论分析表明所提保护方案具备强大的耐受故障电阻和噪声干扰的能力。4.3 节和 4.5 节分别仿真验证了所提保护方案可以耐受 800 $\Omega$ 的故障电阻和 10dB 的噪声干扰。3.7 节理论分析了所提保护方案较已有保护方案具备更强大的抗干扰能力。限于篇幅,本文以基于电流相似度保护方案为例验证所提保护方案的优越性。基于两侧故障电流相似度的保护方案(transient current correlation, TCC)利用两端故障电流的变化趋势构造故障识别判据。区内故障时,两侧故障电流的余弦相似度为 1;区外故障时余弦相似度为-1。具体故障判据为

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{1i} I_{2i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{1i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{2i})^2}} \quad (24)$$

区内故障:  $H > 0.9$

式中:  $I_1$  和  $I_2$  分别为两侧故障电流;  $H$  为两侧故障电流的余弦相似度。当余弦相似度大于 0.9 时判断为区内故障。

本文设置不同故障电阻(400、600、800) $\Omega$ 、噪声干扰(20、10)dB 的区内单极接地故障,对比所提保护方案与 TCC 方案的抗干扰能力,仿真结果如图 11 所示。

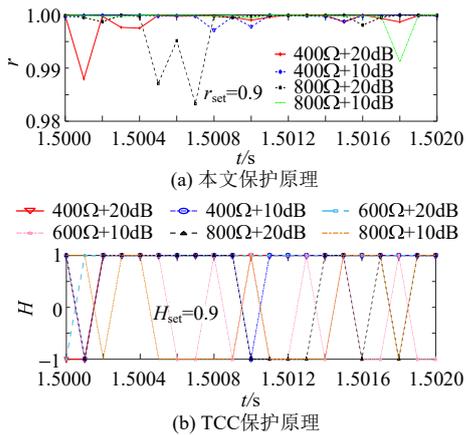


图 11 不同保护方案对比

Fig. 11 Comparison of different protection principles

图 11(a)为本文所提保护方案的仿真结果。当故障电阻由  $400\Omega$  增加至  $800\Omega$ ，噪声比由  $20\text{dB}$  降至  $10\text{dB}$  时，两侧测量波阻抗的欧几里得距离均大于  $0.98$ 。根据故障识别判据(式(15))可以判断其为区内故障。仿真结果表明，高阻故障和噪声干扰同时存在的情况依然不能改变欧几里得距离。因此，所提保护方案具备较强的耐受故障电阻和噪声干扰的能力。

图 11(b)为 TCC 保护方案的仿真结果。当故障电阻和噪声为  $400\Omega+20\text{dB}$ 、 $600\Omega+20\text{dB}$  时，TCC 保护方案的余弦相似度  $H$  大于  $0.9$ 。此时，TCC 保护方案可以正确识别区内故障。当噪声比为  $10\text{dB}$  或者故障电阻增至  $800\Omega$  时，余弦相似度  $H$  将不能满足大于  $0.9$  的故障判据。仿真结果显示  $400\Omega+10\text{dB}$ 、 $600\Omega+10\text{dB}$ 、 $800\Omega+20\text{dB}$ 、 $800\Omega+10\text{dB}$  的故障状态下，TCC 保护方案难以识别区内故障。

综上，所提保护方案具备更强的耐受故障电阻和噪声干扰的能力。

## 5 结论

本文提出一种基于测量波阻抗欧几里得距离和相似系数的行波纵联保护方案。首先解析柔性直流系统测量波阻抗的幅频特性及变化趋势特性，随后利用测量波阻抗幅值及变化趋势的欧几里得距离识别区内、外故障。所提保护方案具有以下特点：

- 1) 所提保护方案不受分布电容的影响，缩减了后备保护方案的动作时间。
- 2) 利用初始行波测量波阻抗的整体变化趋势及幅值差异构造故障判据，增强了所提保护方案的可靠性。
- 3) 利用测量波阻抗的欧几里得距离不受故障电阻影响的特性，增强了所提保护方案耐故障电阻的能力；利用模极大值和欧几里得算法去噪，增强了所提保护方案耐噪声干扰的能力。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwj.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- [1] 刘泽洪, 郭贤珊. 高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术研究与应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3604-3613.  
LIU Zehong, GUO Xianshan. High-voltage large-capacity VSC valve reliability enhancement[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3604-3613(in Chinese).
- [2] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的柔性直流电网纵联保护[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 4001-4010.  
SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Pilot protection of flexible DC grid based on active detection[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 4001-4010(in Chinese).
- [3] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6592.  
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6592(in Chinese).
- [4] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3832.  
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3832(in Chinese).
- [5] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.  
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759(in Chinese).
- [6] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3176-3186.  
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3176-3186(in Chinese).
- [7] 吴沛锋, 张国云, 孔令号. 基于全波电流关联性的线路差动保护算法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2584-2591.  
WU Peifeng, ZHANG Guoyun, KONG Linghao. A new line differential protection principle based on correlation of full wave current data[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2584-2591(in Chinese).
- [8] 黄强, 邹贵彬, 高磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.  
HUANG Qiang, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840(in Chinese).
- [9] 贾科, 李猛, 毕天姝, 等. 柔性直流配电网线路能量分布差动保护[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3058-3065.  
JIA Ke, LI Meng, BI Tianshu, et al. Energy distribution-based differential protection for VSC-DC distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3058-3065(in Chinese).
- [10] 张峻樾, 向往, 饶宏, 等. 含直流断路器的架空柔性直流电网直流故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4631-4645.  
ZHANG Junjie, XIANG Wang, RAO Hong, et al. Research on DC fault protection scheme of overhead MMC based DC grid with DC

- circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4631-4645(in Chinese).
- [11] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111. SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111(in Chinese).
- [12] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等.  $\Pi$ 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18. SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on  $\Pi$ -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18(in Chinese).
- [13] JIA Ke, WANG Congbo, BI Tianshu, et al. Protection for DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(11): 9927-9936.
- [14] 陈洋, 黄纯, 陈为熙, 等. 基于测量波阻抗的母线保护新方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 198-203. CHEN Yang, HUANG Chun, CHEN Weixi, et al. A novel approach for busbar protection based on measured surge impedance[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 198-203(in Chinese).
- [15] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119. LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel surge impedance directional relay based on S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 113-119(in Chinese).
- [16] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的行波相位比较式方向继电器[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 744-749. LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. S transform based travelling wave phase comparison directional relay[J]. Power System Technology, 2013, 38(3): 744-749(in Chinese).
- [17] 李小鹏, 滕予非, 刘耀, 等. 基于测量波阻抗的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 617-623. LI Xiaopeng, TENG Yufei, LIU Yao, et al. Pilot protection based on measured surge impedance for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 617-623(in Chinese).
- [18] 李小鹏, 汤涌, 朱清代, 等. 利用测量波阻抗相位特征的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1251-1258. LI Xiaopeng, TANG Yong, ZHU Qingdai, et al. Pilot protection for HVDC transmission lines utilizing phase features of measured surge impedance[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1251-1258(in Chinese).
- [19] 李岩, 龚雁峰, 姜斌. 基于波阻抗的多端直流电网快速保护方案[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2609-2616. LI Yan, GONG Yanfeng, JIANG Bin. A fast protection scheme for multi-terminal HVDC grid based on surge impedance[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2609-2616(in Chinese).
- [20] LIU Xiaolei, OSMAN A H, MALIK O P. Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar HVDC line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 569-578.
- [21] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43. DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43(in Chinese).
- [22] 杨赛昭, 向往, 文劲宇. 基于限流电抗器电压差异性的架空柔直电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1196-1211. YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu, et al. A fault protection scheme based on the difference of current-limiting reactor voltage for overhead MMC based DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1196-1211(in Chinese).
- [23] 邓艳平, 杨秀, 张美霞, 等. 基于欧氏距离法的换流变压器短路电流和励磁涌流的辨识[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2671-2676. DENG Yanping, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Discrimination of magnetizing inrush and short circuit current of converter transformer based on euclidean distance[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2671-2676(in Chinese).
- [24] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3832-3840. CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840(in Chinese).
- [25] 郑大勇, 张品佳. 交流电机定子绝缘故障诊断与在线监测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 395-406. ZHENG Dayong, ZHANG Pinjia. A review of fault diagnosis and online condition monitoring of stator insulation in AC electrical machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 395-406(in Chinese).
- [26] 张国伟. 基于小波变换的图像去噪方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.



张大海

在线出版日期: 2021-03-31。

收稿日期: 2020-10-21。

作者简介:

张大海(1973), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 博士生导师, 研究方向为电力系统监控、继电保护与电能质量, E-mail: dhzhang1@bjtu.edu.cn;

武传健(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为直流电网保护技术, E-mail: 19117032@bjtu.edu.cn;

和敬涵(1964), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、电力系统自愈恢复、主动配电网, E-mail: jhhe@bjtu.edu.cn。

(责任编辑 王晔)

## 附录 A

表 A1 张北柔性直流工程参数

Table A1 Parameters of Zhangbei flexible DC project

元件	参数	MMC1、MMC2	MMC3、MMC4
MMC 换流器	单个桥臂子模块数	244	244
	子模块电容/MF	8	15
	子模块稳态工作电压/kV	2.193	
	IGBT 参数	4.5kV/2kA	4.5kV/3kA
	桥臂电抗器/mH	100	75
限流	极线/mH	150	
电抗器	金属回线	300	
线路参数	电阻 $\Omega$ /km	0.00995	
	电感 mH/km	0.86	
	对地电容 $\mu$ F/km	$7.90 \times 10^{-3}$	