

一种基于边界特性的高压直流输电线路 单端量保护方法

韩昆仑, 刘书豪, 代宇, 杨东睿

(广西大学电气工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 分析高压直流输电线路和线路边界对高频信号的衰减作用在目前高压直流线路保护方面的影响。研究边界和线路的频率特性, 针对传统基于电气量导数的行波保护耐受过渡电阻能力差的问题, 提出一种基于电气量二阶微分量的单端保护方法。经过二阶微分变换后放大暂态故障分量信息, 并利用边界内外的二阶微分量差异进行故障判别。在所提出的直流保护方案中, 仅利用单端故障暂态信息即可实现全线路保护。在 PSCAD/EMTDC 中进行仿真分析, 结果表明, 所提出的判据能够对区内故障进行准确识别, 且该方法不受线路长度和过渡电阻的影响, 可以实现全线速动。

关键词: 高压直流输电; 单端量保护; 二阶微分量; 线路边界; 过渡电阻

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.009 中图分类号: TM733 文章编号: 1673-9140(2023)02-0075-09

A single-terminal protection method for HVDC transmission line based on boundary characteristics

HAN Kunlun, LIU Shuhao, DAI Yu, YANG Dongrui

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper analyzes the influences of the attenuation of high frequency signals by the HVDC transmission lines and line boundaries on the current HVDC transmission line protections. The frequency characteristics of boundary and line are also studied. The traditional traveling wave protection approaches based on the derivative of electrical quantity generally have poor tolerance to transition resistance. To solve this, a single-ended protection method based on the second-order micro-component of electrical quantity is proposed, where the transient fault component information after the second-order differential transformation will be amplified, and the difference of second-order differential variables inside and outside the boundary are utilized to judge the fault. In the proposed DC protection scheme, full line protections can be realized only by the single-ended fault transient information. The simulation analysis is carried out in PSCAD/EMTDC, and the results show that this criterion can accurately distinguish internal and external faults, and select fault poles, which indicates its strong ability to withstand the influence of transition resistance and long transmission lines, thus can realize full-line quick action.

Key words: HVDC transmission; single-ended protection; second-order micro component; line boundary; transition resistance

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2022-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(51567003)

通信作者: 杨东睿(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压直流输电技术研究; E-mail: 415586299@qq.com

由于高压直流输电系统中的线路跨度大,沿途环境恶劣,其线路发生短路事故的可能性大大增加。根据相关数据,发生在高压直流输电系统中的故障有近50%与直流输电线路有关^[1],直流输电线路故障的快速识别对于整个系统能否安全稳定运行起着至关重要的作用。

目前,线路主保护一般配置行波保护和微分欠压保护,后备保护则选用电流差动保护^[2-3]。行波保护和微分欠压保护动作速度快,通常直流保护的动作时间约为2 ms,但受过渡电阻影响较大^[4-6],且易受雷电、换相失败、交流侧故障等暂态现象的干扰,可靠性不足;纵联电流差动保护有良好的耐受过渡电阻能力,但现有差动保护线路分布电容电流影响,保护动作较慢^[7-8]。因此,需要对现有的特高压直流输电线路保护进行进一步的改进和优化^[9]。线路两端的滤波器和平波电抗器等装置构成直流线路的物理边界,直流线路保护均以此为边界条件,利用边界对高频分量的衰减作用构造保护^[10]。双端电气量的线路保护方式依赖于通信,保护的快速性较差^[11-13]。同时,由于换流器的高可控性与脆弱性对继电保护的動作速度提出严格要求。利用单端量的线路保护近年来成为研究热点^[14]。

国内外关于高压直流输电线路单端暂态量保护的基本思路是:直流滤波器和两端的平波电抗器构成高压直流输电线路边界,对暂态高频电气量呈带阻变特性,来自直流线路区外的高频量通过边界后被衰减,能量显著减小,因此,可以此为依据,区分区内故障。文献[15]以此为基础提出了一种区分区内故障的方法,但所提方法未考虑线路的频率特性,且未对来自整流侧和逆变侧的区外故障作出区分。文献[16]指出线路对高频分量具有衰减作用,线路越长,衰减作用越明显,当故障发生在线路远端某处时,线路对高频量分量的衰减程度有可能超过边界对高频量的衰减。此时,利用保护元件区分本侧区内故障的方法将受到约束,在此基础上,该文献提出一种利用线路和“边界”对高频量的双重衰减作用来区分对侧的区内故障的方法。文献[17]对线路和边界对高频信号的衰减作用做出定量分析。可以看出,当线路足够长时,线路对高频量的衰减将远大于边界,若再考虑过渡电

阻影响,则线路对高频量的衰减作用和线路与边界的双重衰减将很难有效辨识。

在上述研究的基础上,本文分析了高压直流输电线路故障的暂态特性,提出了一种基于二阶微分原理的直流线路保护方案,该方案可有效区分本侧区内故障、提取长线路对侧区内差异信息,实现全线速动保护。

1 高压直流输电系统频率特性分析

1.1 双极直流输电系统的组成

双极高压直流输电系统主要包括整流站和逆变站、输电线路3个部分,其基本结构如图1所示。其中AC表示直流输电系统两端的交流系统, f_1 是在本极线路内部的故障, f_2 是整流侧外侧的故障点, f_3 是逆变侧外侧的故障点, f_4 是对极线路内部故障。本文所提的本极线路本侧未经说明均指正极线路整流侧。

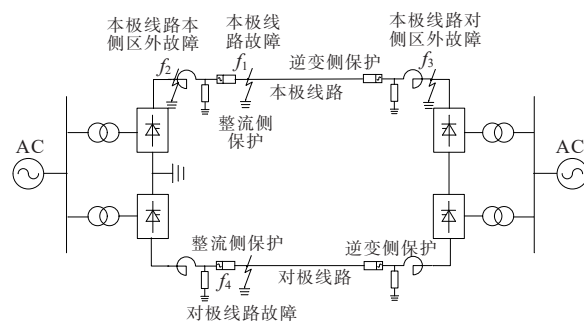


图1 双极高压直流系统结构

Figure 1 Schematic diagram of bipolar HVDC system

1.2 边界频率特性分析

本文的边界按照云广±800 kV特高压直流输电工程中的参数搭建,该工程线路两端装设有平波电抗器、直流滤波器、PLC滤波器。直流系统边界的具体结构和各元件的参数由图2和表1给出。

平波电抗器的阻抗值为

$$Z_0(j\omega) = j\omega L_0 \quad (1)$$

同理,直流滤波器的阻抗值为

$$Z_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2} + \frac{j\omega L_3}{1 - \omega^2 L_3 C_3} \right) \quad (2)$$

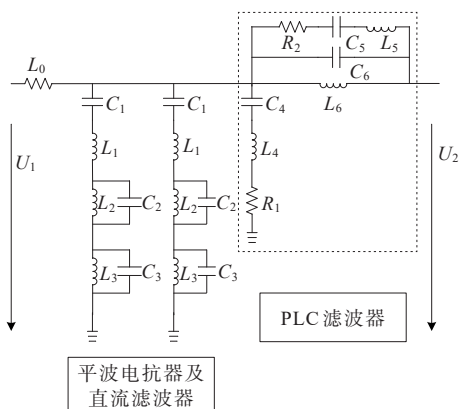


图 2 云广特高压直流输电线路边界

Figure 2 Boundary of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission line

表 1 直流线路边界元件参数

Table 1 Lists of DC line boundary components

L_0/mH	L_1/mH	L_2/mH	L_3/mH	L_4/mH
300	11.773	10.26	4.77	12
L_5/mH	L_6/mH	$C_1/\mu\text{F}$	$C_2/\mu\text{F}$	$C_3/\mu\text{F}$
200	200	2	3.414	11.773
C_4/nF	C_5/nF	C_6/nF	R_1/Ω	R_2/Ω
20	20	25	2	400

为简化分析,假设直流线路开路,即认为 PLC 滤波器上的压降为 0。

则 PLC 滤波器的阻抗值为

$$Z_2 = R_1 + j\omega L_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \quad (3)$$

根据幅频特性分析,平波电抗器具有低通滤波的特点,而 PLC 滤波器和直流滤波器具有高通滤波的特点^[3]。

由式(1)~(3)表明,直流系统的边界设备对高频暂态电流信号有衰减作用。

只考虑平波电抗器和直流滤波器上的压降,则直流线路边界的传递函数定义为平波电抗器线路侧与阀侧电压的比值,即

$$G(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} \quad (4)$$

由以上条件可得边界设备传递函数波特图,如图 3 所示。

由图 3 中可以看出,在低频段,幅频特性的分贝值为 0,即 $G(j\omega) = 1$,随着频率的增加,尽管在某些谐振点处 $G(j\omega)$ 的值出现极大极小值,但总体呈下降趋势,说明线路边界对故障高频暂态电流信号有明显衰减作用。

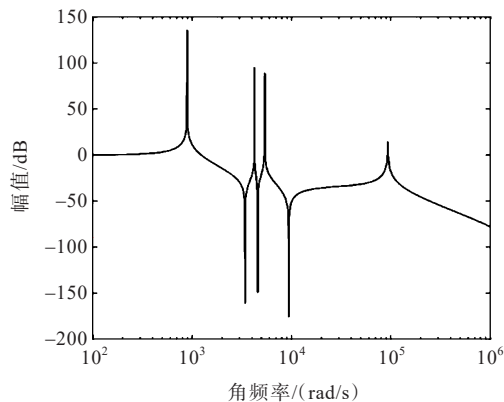


图 3 云广直流输电线路边界幅频特性曲线

Figure 3 Amplitude-frequency characteristic curve of Yunnan-Guangdong HVDC line boundary

1.3 线路频率特性分析

对于长直流输电线路,考虑其均匀传输线的分布参数特性,将直流输电线路视为沿线参数处处相等的均匀传输线,则其长度为 dx 的某一段微元的电路模型,如图 4 所示,其中, r_a 、 l_a 、 g_a 、 c_a 分别为线路单位长度电阻、电感、电导、电容。

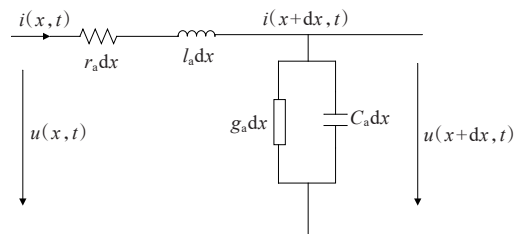


图 4 微段传输线电路模型

Figure 4 Circuit model of micro-segment transmission line

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = r_a i + l_a \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = g_a u + c_a \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)为传输线方程,在给定初始条件首段电压电流后,得到其通解:

$$\begin{cases} \dot{U}(x, j\omega) = \frac{1}{2} (\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2} (\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1) e^{\gamma x} \\ \dot{I}(x, j\omega) = \frac{1}{2Z_c} (\dot{U}_1 + Z_c \dot{I}_1) e^{-\gamma x} - \frac{1}{2Z_c} (\dot{U}_1 - Z_c \dot{I}_1) e^{\gamma x} \end{cases} \quad (6)$$

式中, \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 分别为首段电压和电流; $\dot{U}(x, j\omega)$ 、 $\dot{I}(x, j\omega)$ 分别为线路上距离首段 x 处的电压和电流; Z_c 为波阻抗; γ 为传播系数,为简化分析过程,忽略线路电导和电阻的影响,即 $\gamma = \omega \sqrt{l_a c_a}$,根据传输

线方程可知,随着传播距离和谐波频率的增大,电压和电流的幅值越小,即表明故障高频暂态电流信号受长线路的衰减作用明显^[18]。

2 故障特性分析

2.1 本侧区内外故障时电流极性分析

根据叠加定理:故障发生瞬间,故障全电流可视为系统正常工况下的负荷电流和电流故障分量的叠加^[19],即

$$I_g = \Delta I + I \quad (7)$$

式中, I_g 为故障时刻保护安装处测得的电流; I 为正常运行时保护安装处测得的电流; ΔI 为暂态电流故障分量。

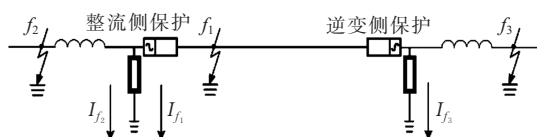


图5 故障电流情况

Figure 5 Fault current illustration

在图1的模型中按图5的情况对接地故障进行分析,当发生本侧区外接地故障 f_2 时,故障电流 I_{f_2} 从故障点流入接地极,导致保护安装处检测到的电流减小;当发生线路故障 f_1 或对侧区外故障 f_3 时,故障电流 I_{f_1} 和 I_{f_3} 仍经整流侧保护装置处,导致检测到的电流增大^[20]。

令故障时刻为0.5 s,持续时间0.1 s,过渡电阻均为100 Ω ,区内故障 f_1 位于线路首端,则整流侧保护安装处检测到的电流故障分量波形如图6所示。

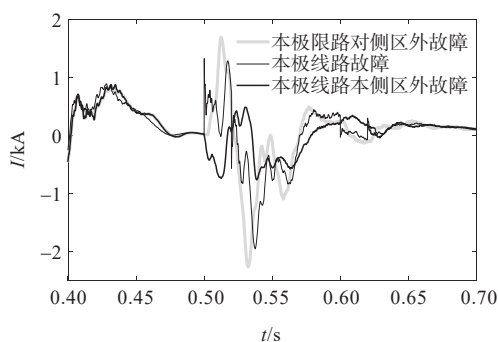


图6 本侧区外故障和对侧区内外故障检测的电流分量故障波形

Figure 6 Current waveforms detected when there are faults outside the local area and faults inside and outside the opposite area

经上述分析可知,故障发生瞬间,若为本侧区外故障,电流故障分量减小向下突变;若为本侧区内故障或对侧区外故障,电流故障分量增大向上突变。因此可利用电流故障分量的变化情况区分本侧区内外故障。

2.2 基于二阶微分量的故障特征量提取

前文介绍了故障时区内外故障时的电流极性差异,本节将介绍一种故障发生时的故障时刻的标定方法,由于直流线路结构复杂,线路、边界及过渡电阻都会影响电流故障分量的大小,当直流系统发生高阻接地故障时,故障信号较小,故本文使用二阶微分法放大故障特征,从而更直观地识别故障信息^[20]。

直流系统发生故障后,在短时间内故障暂态电流迅速上升,故障暂态过程中的电流故障分量可近似为阶跃波^[21],因此可采用傅里叶变换将其分解为如下正弦波和的形式:

$$f(t) = \frac{4A}{\pi} (\sin(\omega_1 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_1 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_1 t) + \dots + \frac{1}{k} \sin(k\omega_1 t)) \quad (8)$$

其中, A 为阶跃波幅值,各项正弦波幅值与频率成反比。

对其作二阶微分:

$$\frac{d^2 f}{dt^2} = -\frac{4A}{\pi} (\omega_1^2 \sin(\omega_1 t) + 3\omega_1^2 \sin(3\omega_1 t) + 5\omega_1^2 \sin(5\omega_1 t) + \dots + k\omega_1^2 \sin(k\omega_1 t)) \quad (9)$$

正弦波幅值与频率成正比。此时,高频分量将对二阶微分量的幅值起决定作用。结合前文分析,考虑经过边界和线路的衰减后高频分量的差异,可以利用二阶微分量的幅值来区分区内外故障。

本文对电流及其变化率的导数进行了数值计算。

一阶微分计算:本文中以前向差分运算近似代替微分运算,表达式如下:

$$\frac{di}{dt} = \lim_{Dt \rightarrow 0} \frac{i(t_0 + Dt) - i(t_0)}{Dt} = \frac{Di}{Dt} \quad (10)$$

其中, Δi 用以下的前向差分表示为

$$\Delta i = i_{k+1} - i_k \quad (11)$$

式(9)中, k 为采样时刻, i_{k+1} 和 i_k 分别是下一采样时

刻和当前采样时刻的线路故障电流,由于所有测量的采样时间间隔相同,所以在连续采样时可只测量电流差来计算时间导数。

二阶微分计算:使用下一采样时刻和当前采样时刻计算的 $\frac{di}{dt}$ 进行前向差分运算,表达式如下:

$$\frac{d^2i}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{di}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta i}{\Delta t} \right) = \frac{\Delta^2 i}{(\Delta t)^2} \quad (12)$$

假设故障发生在 $k=0$ 时刻,每经过一个采样间隔, k 增加 1,由式(10)可知,计算出 $k=0$ 时刻的二阶差分需要用到 $k=2$ 时刻的电流采样值,因此,故障发生至计算出超过整定值的特征信号至少需要两个采样间隔的时间。因此为了保证准确获取故障电流的变化情况必须选择合适的采样频率。表 2 计算出了不同故障位置时的故障电流到达峰值的时刻。

表 2 不同故障距离下故障电流到达峰值时刻

Table 2 The time of peak fault currents under different fault distance

故障距离/km	上升时间/ μ s	故障距离/km	上升时间/ μ s
200	0.20	1 000	0.62
400	0.22	1 200	0.94
600	0.26	1 400	1.12
800	0.38	1 600	1.56

由表 2 可知,故障电流达到峰值的最短时间为 200 μ s,为准确获取电流微分的变化情况,取其五分之一的时间作为采样间隔,即将采样频率设置为 25 kHz。

根据电流故障分量的二阶微分量信息可以确定故障是否发生以及故障发生的时刻。在图 1 的模型中以故障 f_2 为例,其中过渡电阻 100 Ω ,故障发生时刻为 $t=0.5$ s,得到的故障极和健全极的电流波形及其二阶微分量如图 7 所示。

实验证明,电流故障分量的二阶微分量可以反映故障的重要信息,图 7(a)为电流故障分量波形,可以看出故障时刻、故障极和健全极均会产生电流变化,图 7(b)中, $t=0.5$ s 时二阶微分量会有 2 个明显的脉冲,其中前一个与故障时刻对应,2 个脉冲的时间间隔等于仿真中微分环节的时间常数,因此,第 1 个脉冲及其时刻可以用来判别故障是否发生及

时刻。图 7(c)为健全极电流故障分量的二阶微分量,可以看出,其不受故障极的影响。

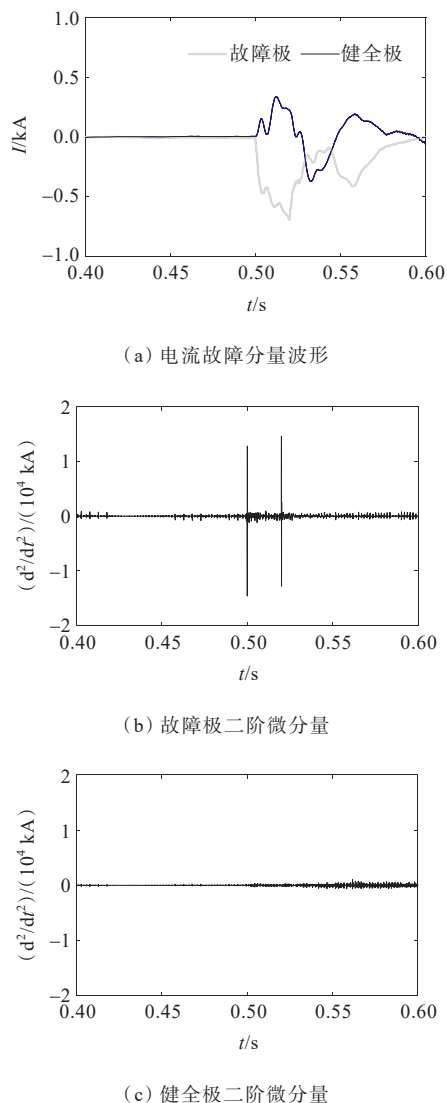


图 7 电流故障分量及其二阶微分量

Figure 7 Fault current component and its second-order differential component

再以图 1 模型为例,选取区内故障线路故障 f_1 和对侧区外故障 f_3 ,其中故障 f_1 分别研究其线路首端和末端,线路全长 1 600 km。得到的结果如图 8 所示。

图 8(a)为正常工况下电流故障分量的二阶微分量,图 8(b)、(c)、(d)分别为线路首端故障、线路末端故障和对侧区外故障时的二阶微分量。可以看出,二阶微分量经过线路和“边界”的双重衰减后,对对侧区外故障不敏感,因此可以用于区分对侧区内外故障。

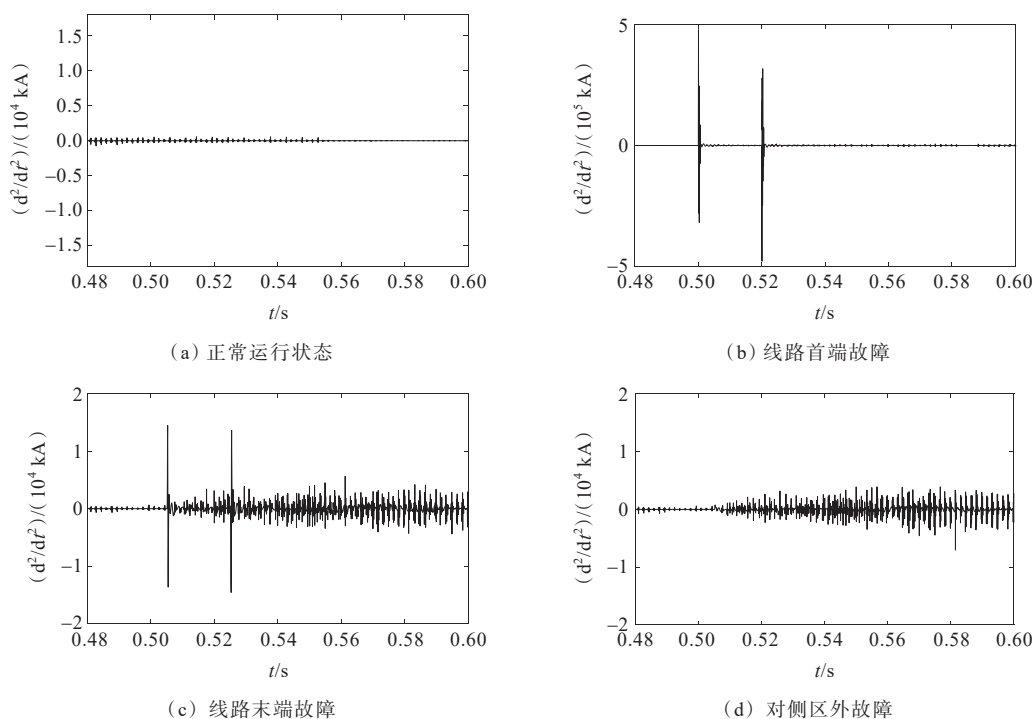


图8 线路故障和对侧区外故障二阶微分量特性

Figure 8 Second-order micro-component characteristics of inside and opposite outside faults

3 保护方案与算例分析

3.1 保护整定值选取

由于高频量受感性元件影响较大,二阶微分量的幅值受到线路感性元件和“边界”平波电抗器感抗值的影响较大。因此,保护的整定计算应结合线路长度和平波电抗器的感抗值来进行。保护定值的整定要求能区分线路末端故障与对侧区外故障,按躲过区外故障时可能的最大值进行设置:

$$H_{\text{set}} = K_{\text{rel}} \cdot k_{\text{max}} \quad (13)$$

其中, H_{set} 为保护整定值, k_{max} 为对侧区外故障时故障电流二阶微分量可能的最大值,即按躲过对侧区外最严重的金属性接地时取得的二阶微分量最大值,其仿真结果如图9所示。 K_{rel} 为可靠系数,通常取1.1~1.2。本文在此选取线路长度为1 600 km、平波电抗器感抗值为300 mH,针对此模型,设置 $H_{\text{set}}=8\ 000\ \text{kA}$ 。

3.2 保护方案流程

在前述故障特征分析的基础上得到基于二阶微分量的线路保护方案:

1) 检测保护装置电流故障分量的二阶微分量,若大于设定值 H_{set} ,则可以判定为区内线路发生故

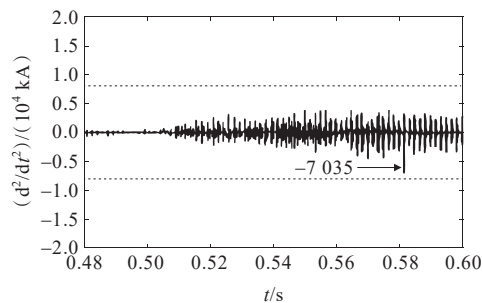


图9 区外金属性接地的故障电流二阶微分量

Figure 9 Second-order differential component of fault current with metallic grounding outside the zone

障或本侧区外故障。

2) 根据二阶微分量脉冲时刻确定故障时刻,同时启动方向判据。

3) 检测该处保护装置在故障时刻电流的变化方向,若电流增大向上突变,即为线路故障,若电流减小向下突变,即为本侧区外故障。

3.3 过渡电阻大小影响

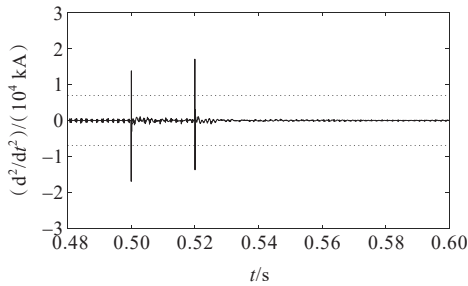
为分析过渡电阻的影响,线路长度恒定为1 600 km,分别以区内线路末端故障和本侧区外故障为例,先令线路参数其他不变,逐渐增大过渡电阻至 $100\ \Omega$,对于不同过渡电阻值的仿真结果如表3所示,图10(a)为线路末端带 $100\ \Omega$ 过渡电阻故障

时的二阶微分量波形;同样条件下, f_2 本侧区外发生故障时仿真结果如表 4 所示,图 10(b)为本侧区外过渡电阻增大到 100Ω 时的二阶微分量波形。可以看出,线路故障时其受过渡电阻影响较大,区外故障时不同过渡电阻结果较为接近,但均不影响保护判据。

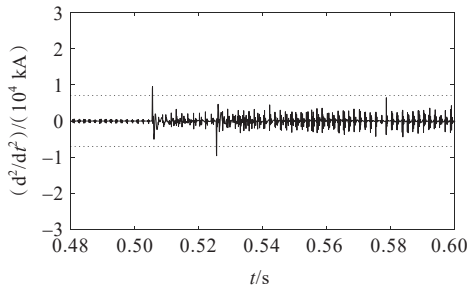
表 3 区内故障过渡电阻变化仿真结果

Table 3 Changes of transition resistance in the region

过渡电阻/ Ω	脉冲发生时刻/s	幅值/ (10^4 kA)
0	0.505 4	2.827
20	0.505 4	2.222
50	0.505 4	1.516
100	0.505 4	0.957



(a) 区内故障过渡电阻影响



(b) 区外故障过渡电阻影响

图 10 区内外故障过渡电阻影响仿真结果

Figure 10 The impacts of transition resistance when faults occur in and out of the area

表 4 区外故障过渡电阻变化仿真结果

Table 4 Changes of transition resistance outside the region

过渡电阻/ Ω	脉冲发生时刻/s	幅值/ (10^4 kA)
0	0.500 1	1.827
20	0.500 1	1.798
50	0.500 1	1.756
100	0.500 1	1.689

3.4 故障距离影响

为分析故障距离的影响,选取过渡电阻恒定为 0Ω ,线路长度为 $1\ 600 \text{ km}$,分别在线路距离整流侧保护装置不同位置设置故障 f_1 ,研究故障距离对保护方案的影响。控制线路参数不变,逐渐增大故障距离,发生故障时仿真结果如表 5 所示,图 11 为故障距离增大到 $1\ 600 \text{ km}$ 时的二阶微分量波形。仿真结果表明故障距离对结果影响较大,在本文的仿真分析中,最大故障距离 $1\ 600 \text{ km}$ 时可以准确区分故障。

表 5 区内故障故障距离变化仿真结果

Table 5 Changes of fault distance in the region

故障距离/km	脉冲发生时刻/s	幅值/ (10^4 kA)
800	0.502 7	9.493
1 200	0.504 0	5.727
1 600	0.505 4	2.827

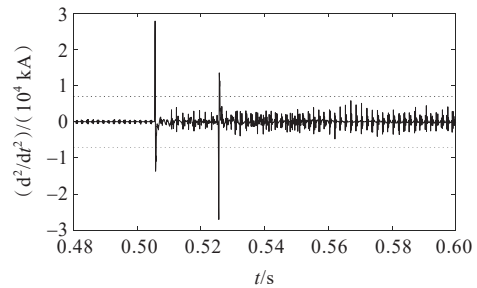


图 11 故障距离影响仿真结果

Figure 11 The impact of fault distance

表 6 给出了所提的云广直流输电系统行波保护拒动时的过渡电阻临界值,可以看出,云广行波保护在其 960 km 线路末端发生故障时候,当过渡电阻超过 18Ω 时将拒动,相比而言,本文所提保护方案在耐受过渡能力方面有明显优势,保护的灵敏性更高。

表 6 行波保护拒动时过渡电阻临界值

Table 6 Critical value of transition resistance when traveling wave protection fails to operate

故障位置	临界过渡电阻/ Ω
整流侧出口	113
线路中点	25
逆变侧出口	18

4 结语

本文分析了直流线路边界和线路对高频信号的衰减作用,提出了一种利用电流故障分量的二阶微分量识别故障的单端量保护方法。该方案具有如下特征:

1) 高频电气量的幅值与频率成反比,提取二阶微分后,幅值与频率成正比,高频量的差异将在保护特征量的幅值上构成明显区分;

2) 该方法不受两极线路耦合作用的影响,具有一定的耐受过渡电阻能力,在一定线路长度范围内,可以保护线路全长;

3) 利用单端数据构造保护,动作时间为毫秒级,满足保护的速动性要求。

参考文献:

- [1] 张艳霞,李多多,张帅,等.基于广义S变换的高压直流输电线路边界保护[J].高电压技术,2018,44(10):3197-3206.
ZHANG Yanxia,LI Duoduo,ZHANG Shuai,et al.Boundary protection of HVDC transmission lines based on generalized S-transform[J].High Voltage Engineering,2018,44(10):3197-3206.
- [2] 朱金涛,辛业春.柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J].智慧电力,2021,49(3):1-11+94.
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power,2021,49(3):1-11+94.
- [3] 段建东,万媛,陆雯,等.高压直流输电线路边界保护算法[J].电力科学与技术学报,2013,28(2):22-27.
DUAN Jiandong,WAN Yuan,LU Wen,et al.Research on transient-based boundary protection for HVDC transmission lines[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2013,28(2):22-27.
- [4] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等.高压直流输电线路微分欠压保护特征量动态特性分析与整定[J].电力自动化设备,2014,34(2):114-119.
HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characteristic analysis and setting of characteristic parameters of differential under-voltage protection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):114-119.
- [5] 宋国兵,张晨浩,杨黎明,等.利用波前信息的直流输电线路超高速保护原理[J].电网技术,2019,43(2):576-581.
SONG Guobing, ZHANG Chenhao, YANG Liming, et al. Principle of ultra-high-speed protection for DC transmission line using wave front information[J]. Power System Technology,2019,43(2):576-581.
- [6] 丁佳立,王昕,郑益慧,等.利用线路中点电流检测的改进单端行波故障测距方法[J].高电压技术,2020,46(5):1814-1822.
DING Jiali, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Improved method for fault location of single-ended traveling-wave using line midpoint current measurement[J]. High Voltage Engineering,2020,46(5):1814-1822.
- [7] 雷傲宇,董新洲.超/特高压输电线路宽频窗短时窗行波差动保护方法[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6826-6835+7096.
LEI Aoyu,DONG Xinzhou.Wide-frequency and short-time window based traveling wave differential protection method for EHV/UHV transmission lines[J].Proceedings of the CSEE,2019,39(23):6826-6835+7096.
- [8] 刘剑,范春菊,邵能灵.用于高压直流输电线路的新型横差保护方法[J].高电压技术,2016,42(7):2266-2274.
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Novel transverse differential protection method for HVDC transmission line [J].High Voltage Engineering,2016,42(7):2266-2274.
- [9] 王钢,李志铿,李海锋.±800 kV特高压直流线路暂态保护[J].电力系统自动化,2007,31(21):40-43+48.
WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng. Transient based protection for ±800 kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):40-43,48.
- [10] 陈剑,杜文娟,王海风.基于对抗式迁移学习的含柔性高压直流输电的风电系统次同步振荡源定位[J].电工技术学报,2021,36(22):4703-4715.
CHEN Jian, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Location method of subsynchronous oscillation source in wind power system with VSC-HVDC based on adversarial transfer learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(22):4703-4715.
- [11] 李欢,傅闯,辛清明,等.高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(19):67-79.
LI Huan, FU Chuang, XIN Qingming, et al. Analytical calculation of DC harmonic impedance and DC resonance

- analysis of an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control,2022,50(19):67-79.
- [12] 马仪,申元,王磊,等.基于行波理论的输电线路雷击定位方法研究与应用[J].高电压技术,2014,40(5):1382-1390.
MA Yi, SHEN Yuan, WANG Lei, et al. Lightning fault location method and its application for transmission line based on traveling wave method[J]. High Voltage Engineering,2014,40(5):1382-1390.
- [13] 穆卡,王丰华,刘亚东.基于参数识别的非对称故障双端不同步测距方法[J].高电压技术,2017,43(11):3763-3768.
MU Ka, WANG Fenghua, LIU Yadong. Asynchronous two-terminal fault location method for unbalanced fault based on parameter identification[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3763-3768.
- [14] 王胜辉,王玺铭,董兴浩,等.特高压直流输电线路极间搭接塑料薄膜的放电模拟试验[J].中国电力,2022,55(6):103-110.
WANG Shenghui, WANG Ximing, DONG Xinghao, et al. Simulation experiment on discharge of plastic film overlapping on UHVDC transmission lines[J]. Electric Power,2022,55(6):103-110.
- [15] 廖名洋,张文,袁海,等.基于多脉冲注入法的高压直流输电接地极线路故障测距[J].电网与清洁能源,2022,38(9):98-104+111.
LIAO Mingyang, ZHANG Wen, YUAN Hai, et al. A fault location method for HVDC grounding pole line using multi-pulse injection method[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9):98-104+111.
- [16] 娄彦涛,袁妮,刘琦.高压直流输电晶闸管换流阀损耗仿真计算方法研究[J].高压电器,2021,57(1):116-122.
LOU Yantao, YUAN Ni, LIU Qi. Study on simulation calculation method of power losses for HVDC thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 116-122+128.
- [17] 陈仕龙,束洪春,谢佳伟,等.利用保护元件区分对侧区内外故障的特高压直流输电线路双端电压暂态保护原理[J].电力系统保护与控制,2013,41(15):14-20.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jiawei, et al. Principle of double-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line which uses protector to identify the opposite internal and external fault[J]. Power System Protection and Control,2013,41(15):14-20.
- [18] 魏德华,苗世洪,刘子文,等.基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):75-82.
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics[J]. Power System Protection and Control,2018,46(17):75-82.
- [19] 李林,吕彦北,王永平,等.特高压直流输电工程逆变侧控制策略优化设计[J].电力工程技术,2021,40(1):208-214.
LI Lin, LÜ Yanbei, WANG Yongping, et al. Optimal design of inverter side control strategy for UHVDC[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):208-214.
- [20] 陈仕龙,张杰,刘红锐,等.特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J].电工技术学报,2016,31(2):171-177.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, LIU Hongrui, et al. A single-ended current direction transient protection of UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(2):171-177.
- [21] 鲁铁成.电力系统过电压[M].北京:中国水利水电出版社,2009:45-50.
LU Tiecheng. Power system overvoltage[M]. Beijing: China Water & Power Press,2009:45-50.
- [22] 李爱民,蔡泽祥,任达勇,等.高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J].电力系统自动化,2009,33(11):72-75+93.
LI Aimin, CAI Zexiang, REN Dayong, et al. Analysis on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):72-75+93.