

适用于混合双极直流系统的单端电气量保护方法

高淑萍¹, 宋晓辰¹, 叶换飞², 宋国兵³

(1. 西安科技大学电气与控制学院, 710054, 西安; 2. 国网陕西省电力公司榆林供电公司, 719000, 陕西榆林; 3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为提高混合双极高压直流线路保护的速动性、选择性、灵敏性和可靠性, 针对现有线路保护方法存在的适应性问题, 提出了一种基于边界元件暂态分量之比的单端电气量保护方法。该方法利用直流线路区内外故障时的电压特征信号的暂态高频分量差异来实现。对电压故障分量进行小波包变换, 得到各频带暂态能量; 利用低频能量与部分高频能量和的比值构造保护判据, 给出了整定原则, 分析了过渡电阻的影响; 利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建出混合双极高压直流输电模型, 输出各种故障状态的故障数据, 利用 MATLAB 进行故障数据处理, 对所提方法进行仿真验证。结果表明: 在不同的故障情况下, 甚至在区内故障短路接地电阻为 $1\ 000\ \Omega$ 时, 所提方法仍可以准确识别区内外故障, 并自行进行故障选极; 所提保护方法所用数据窗长度短, 仅为 $3\ \text{ms}$, 具有快速性好、耐过渡电阻能力强、可靠性高的优点。

关键词: 混合双极直流输电系统; 单端电气量保护; 暂态能量; 小波包变换; 线路保护

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107009 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0079-09



OSID 码

Single-End Electrical Quantity Protection Method for Hybrid Bipolar DC System

GAO Shuping¹, SONG Xiaochen¹, YE Huanfei², SONG Guobin³

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Yulin Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Yulin, Shaanxi 719000, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve response rate, selectivity, sensitivity and reliability of hybrid double-ended HVDC line protection, a single-ended protection method based on the ratio of transient components of boundary elements is proposed to solve adaptability problem of the existing line protection methods. This protection method is realized by using difference of transient high-frequency components of voltage characteristic signals when an internal or external fault occurs. The voltage fault components are processed by wavelet packet transformation to obtain the transient energy of each frequency band. Then the protection criteria are constructed by using the ratio of low frequency energy to sum of some high frequency energy, the setting principle is given, and the influence of transition resistance is analyzed. A hybrid bipolar HVDC transmission model is constructed in PSCAD/EMTDC to output data of various fault states. Subsequently, the fault data are processed by MATLAB, and the proposed protection method is simulated and verified. Simulation results show that under different fault conditions, this method enables to

accurately identify internal and external faults, and automatically implement faulty pole selection even if an internal fault grounding resistance gets as high as $1\ 000\ \Omega$. The data window used in this protection method is as short as 3 ms, which indicates the advantages of good rapidity, strong tolerance to transition resistance, and high reliability.

Keywords: hybrid bipolar DC transmission system; single-ended electrical quantity protection; transient energy; wavelet packet transform; line protection

相对于交流输电,高压直流输电的优点是输电损耗小、传输容量大^[1-3],但缺点是受端易换相失败。模块化多电平换流器高压直流输电(MMC-HVDC)系统能独立控制有功与无功,不存在换相失败的问题,且能对故障电网提供无功支撑^[4-5]。结合二者的优点,混合高压直流输电系统是目前的研究热点。根据拓扑结构的不同,混合高压直流输电系统可分为:混合双端直流输电系统^[6-7]、混合多端直流输电系统^[8-11]、混合多馈入直流输电系统^[12]、混合双极直流输电系统^[13-14]等。本文主要对第4种系统进行研究,该系统利用电压源换流器(VSC)可对有功和无功快速控制的优点,改善系统的输电性能,逆变侧利用VSC的优点来减小电网换相换流器(LCC)换相失败的概率。该结构尤其适用于具有季节性电能双向流动需求的电网互联工程。

直流输电系统输电线路较长,易受沿线架设环境的影响,故障率较高。故障发生后,需要在数毫秒内准确判别故障的存在,使得保护可靠动作。因此,研究直流线路快速保护非常有意义^[6-8]。

目前,混合直流输电系统的研究集中在对系统模型的构建、控制方式等方面,而对其线路保护的研究却几乎没有,因此本文在传统高压直流和柔性直流线路保护方法的基础上,寻求适合于混合双极直流输电系统的线路保护方法。在传统高压直流和柔性直流的线路保护方面:文献[9]提出利用暂态谐波的幅值来进行故障识别;文献[10]提出利用在分布参数模型的基础上,通过两端所测量的电流数据计算区内某点处的两侧电流和,构造出电流差动保护;文献[11]提出利用小波变换,提取区内外暂态特征值的差异,从而判别故障;文献[12]通过添加平波电抗器作为保护边界,从而提出边界保护原理;文献[13]利用平波电抗器抑制突变的原理,通过比较行波波头的陡度构造保护;文献[14]利用行波在保护边界的折反射构造保护,但是该保护对采样率要求高,可靠性不高;文献[15]利用平波电抗器对高频信号衰减的特性,比较高频信号的幅值,进行保护;文献[16]通过对行波电流波头极性的检测,判断区内

外故障,进行线路保护;文献[17]通过平波电抗器、直流滤波器等构成边界,使信号暂态高频量产生衰减作用,从而构造保护判据,最后搭建模型进行仿真验证;文献[18]提出基于小波多频带能量的暂态保护。单端量保护不需要进行信息交互,可以快速识别故障。暂态能量比值的线路保护方法利用线路特征信号的高低频能量比值,具有较明显的特征。因此,本文将重点研究暂态能量之比的单端电气量保护方法对混合双极直流输电系统的适应性。

本文搭建了 $\pm 500\text{ kV}$ 混合双极直流输电系统模型,并设置了不同故障类型。根据直流线路区内外故障时的电压特征信号高低频能量不同,利用低频能量与部分高频能量和的比值构造保护判据,实现故障甄别。仿真结果表明,所提方法的数据采集时间窗长度为3 ms,具有较强耐过渡电阻的能力,适用于混合双极直流输电系统。

1 混合双极直流输电系统结构及控制策略

1.1 混合双极直流输电系统的结构

本文搭建了 $\pm 500\text{ kV}$ 混合双极直流输电系统,其结构及故障位置如图1所示。正极采用LCC-HVDC,换流单元由1组12脉冲换流器组成;负极采用MMC-HVDC,每相由100个半桥子模块级联而成。

在图1中:线路两端分别用 M 、 N 表示,区内线路保护安装点分别用 a 、 c 表示,整流侧正极及负极出口的分压器和分流器安装位置分别用 p 、 q 表示; L 代表平波电抗器; Z 代表交流测等值阻抗; f_1 代表整流侧正极区外故障, f_2 代表靠近整流侧10%距离的区内故障, f_3 代表靠近整流站90%距离的区内故障, f_4 代表逆变侧正极区外故障, f_5 、 f_6 、 f_7 、 f_8 代表与正极对应的负极故障, f_9 代表区内双极故障。

1.2 混合双极直流输电系统的控制策略

对于正极LCC-HVDC,整流侧为定直流电流控制,附加触发角控制、低压限流控制。逆变侧为定直流电流控制和定关断角控制,附加低压限流部分,见

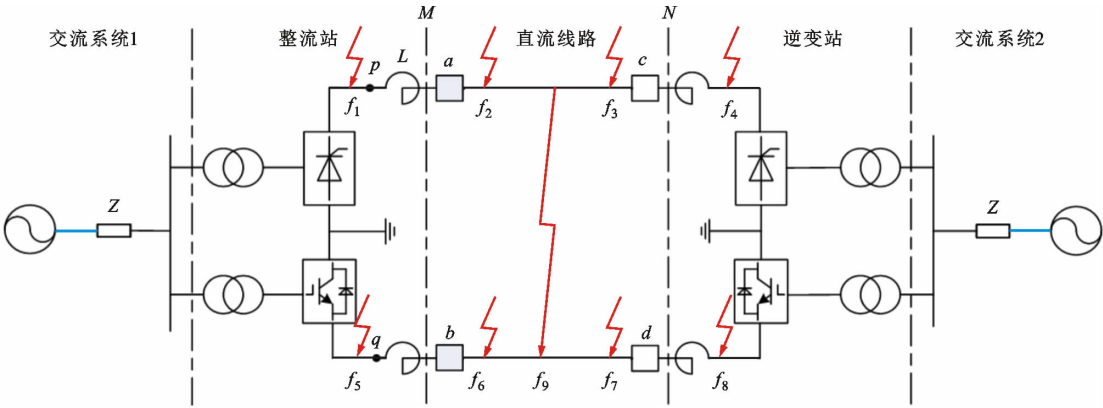


图 1 系统结构及故障

Fig. 1 Hybrid bipolar DC transmission system with faults

图 2。图中： I_{ref1} 为整流侧基准电流， I_{ref2} 为逆变侧基准电流； I_{dr} 为整流侧反馈电流， I_{di} 为逆变侧反馈电流； α 为触发滞后角， β 为触发超前角， γ 为关断角， γ_{ref} 为给定关断角。

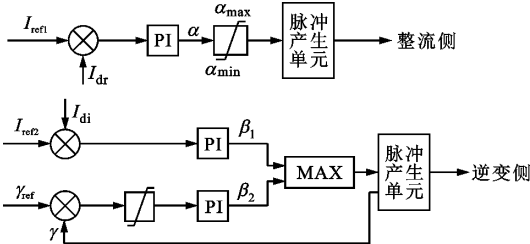


图 2 LCC 控制框图

Fig. 2 Diagram of LCC control block

对于负极 MMC-HVDC，控制方式为间接电流控制和直接电流控制。间接电流控制通过控制 VSC 换流器交流侧的相位和幅值，对整个系统的功率进行调控，其整个控制结构比较简单，但是受系统参数影响大。本文采用的是直接电流控制，分为外环电压控制和内环电流控制，解耦后再触发脉冲生成电路，产生脉冲控制信号^[19-21]，见图 3。图中： i_a 、 i_b 、 i_c 为三相交流电流， u_{ac} 为交流侧 ac 相电压， u_{dc} 为直流侧电压； u_{abc} 为交流侧 abc 三相的相电压； i_q 为 q 轴交流电流， i_d 为 d 轴直流电流， U_{q1} 为 q 轴交流电

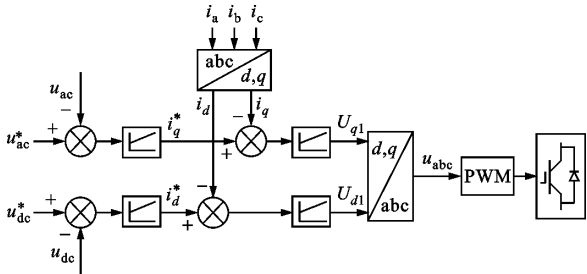


图 3 MMC 控制框图

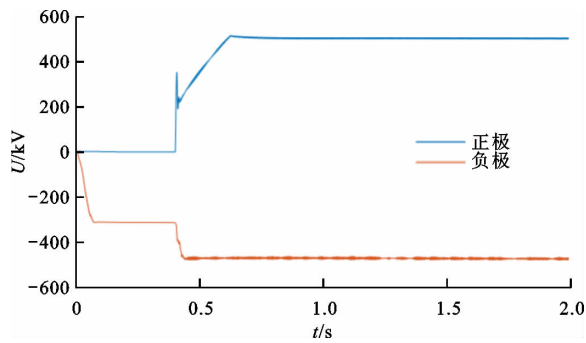
Fig. 3 Diagram of MMC control block

压， U_{d1} 为 d 轴直流电压。尽管正极采用的是 LCC-HVDC，逆变侧存在换相失败的问题，但是负极 MMC-HVDC 的控制方式可以减小正极管换相失败的概率。

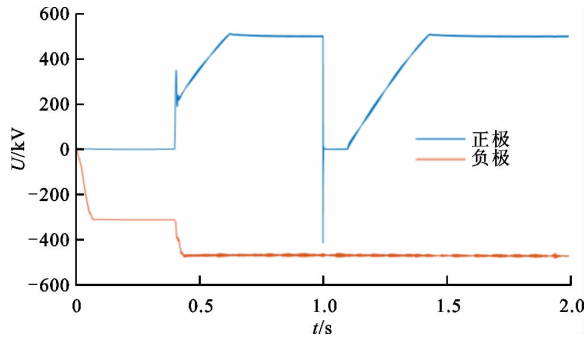
2 直流线路的故障特征

当直流侧发生的故障时，主要会发生单极接地故障和双极短路故障。若发生了单极接地故障，系统往往可以继续保持单极运行，或者降压运行，以此保证有功功率的传输。影响故障特征的因素包括两个方面：第一个方面是受扰后电网络中的储能及其重新分配过程，即电磁暂态过程，该过程与网架结构有关，网架结构中的输电线路并无差异，故模型相同；第二方面的特征为电源对扰动的响应过程，该过程是一个动态过程，稳态特性取决于电源的静特性，动态过程取决于电源出口测点的电气量以及电源控制器对其响应所做的调节过程，该工程 MMC 和 LCC 明显不同。需要说明的是，由于 MMC 和 LCC 对扰动的响应速度比过去的交流电网中的同步电机电源更快，因此导致了两个过程的混叠，即变流器对扰动的响应与网架的电磁暂态过程有重合。本文选取的特征信号为电压信号，故障发生时刻为 1 s，持续时长为 0.1 s。当发生各种故障时，在保护测量点处测量得到的故障波形图如图 4 所示。

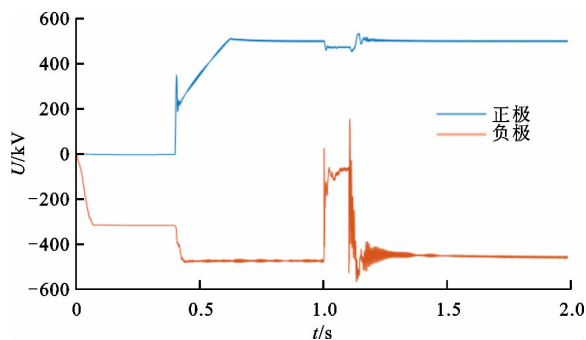
从图 4 可以看出，正极故障和负极故障的电压波形迥然不同，且极间故障的特征也有别于单一输电方式的双极故障特征。造成差异的起始部分是网架结构(线路、滤波器、模块电容、电感等)及参数决定的电磁暂态过程，故障特征的差异是由 MMC 和 LCC 换流器带来的。故障起始过程有差别，这是因为虽然线路一样，但换流器拓扑不一样，所以故障初



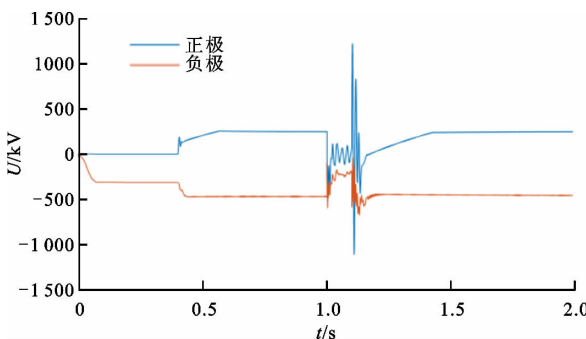
(a) 正常运行电压波形



(b) 正极故障时电压波形



(c) 负极故障时电压波形



(d) 双极故障时电压波形

图4 混合双极直流线路故障波形

Fig. 4 Fault waveforms of each fault of the hybrid bipolar DC line

电方式、控制策略影响了直流线路的故障特征。由于单极故障特征存在差异,导致了非故障极所感应的电压与电流也与传统单一直流输电方式存在差异。因此,有必要研究暂态能量之比的方法是否仍然适用于混合双极直流输电系统,即不仅需要研究这种故障特征差异下,故障极能否正确动作,还需要研究非故障极能否可靠不动作。

3 保护原理及算法

3.1 边界保护的原理

本文搭建的高压混合双极直流输电模型采用平波电抗器作为保护的边界,平波电抗器的作用是抑制故障发生时故障分量的变化,防止换相失败,减少谐波。直流电抗器的电感选取越大,对高频分量的抑制效果就越好,但若过大,容易在运行时产生过电压,系统控制性能变差,因此本文选取 $L=0.01\text{ H}$ 。阻抗的计算公式为

$$Z = j\omega L \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; L 为电感。由此可知,当 L 一定时, Z 随着 ω 的增大而增大,因此直流电抗器对高频的抑制效果明显。

3.1.1 区内故障 若线路发生区内故障,以区内正极故障 f_2 为例,故障附加网络图如图5所示。当线路发生区内故障时,行波从故障点流经线路两侧,遇到障碍物会发生折射和反射,最终经地形成回路^[22]。

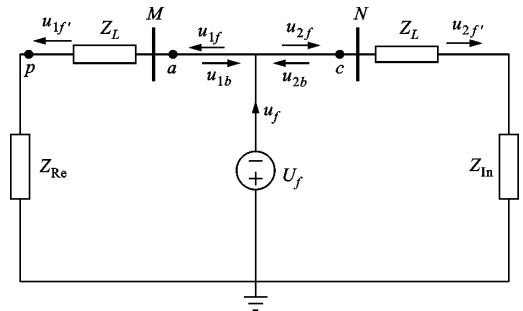


图5 区内故障附加网络图

Fig. 5 Fault traveling wave diagram under an internal fault

图5中: Z_L 为线路平波电抗器等效阻抗; Z_{Re} 、 Z_{In} 分别为换流器等效阻抗的实部和虚部; U_f 为故障时故障附加网络电压源。 u_f 为故障发生时产生的行波,其由故障点流经线路两侧分为 u_{1f} 和 u_{2f} ,在遇到平波电抗器时,行波在线路上发生了折射和反射,分为 $u_{1f'}$ 、 u_{1b} 和 $u_{2f'}$ 、 u_{2b} 。当发生区内故障,行波在传播过程中遇到平波电抗器,会发生能量衰减,即

$$E_a > E_p \quad (2)$$

式中 E_a 与 E_p 分别表示 a 与 p 处行波电压的高频

瞬不一样;故障调节过程有差别,是换流器的控制策略带来的动特性不同。由此可见,正负极采用的输

暂态能量。同理,在负极整流侧处可得

$$E_b > E_q \quad (3)$$

当发生区内故障时,故障信息中包含丰富的高频和低频信息,行波流经保护安装处 a 、 c ,然后流经边界元件的平波电抗器。平波电抗器对于高频具有抑制阻碍作用,经过后的故障电流包含的低频信息居多,高频能量衰减,而测量点 a 得到的信息是原始的高低频信息。由此可见,区内故障时保护测量处得到的高频分量多。其他的区内故障与之类似,不再赘述。

3.1.2 整流侧直流线路区外故障 整流侧区外故障行波图如图6所示。

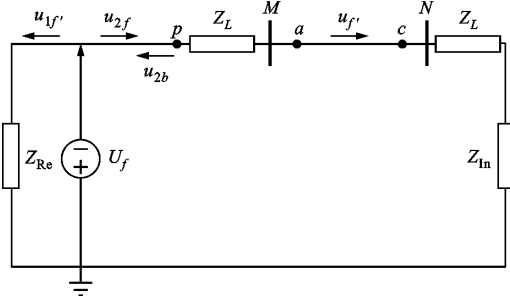


图6 整流侧直流出口处区外故障行波图

Fig. 6 Fault traveling wave diagram under an external fault on outside of DC outlet of the rectifier side

由图6可知,行波在线路传播时,流经 p 处到达平波电抗器,发生折射与反射。由此可见,发生区外故障时,行波经 p 点过平波电抗器发生能量衰减,到达区内 a 点时, a 与 p 处行波暂态能量的关系为

$$E_a < E_p \quad (4)$$

同理,在负极整流侧处可得

$$E_b < E_q \quad (5)$$

当发生区外故障时,行波先流经 p 处,之后经过平波电抗器,其后到达保护安装处。由此可见,在保护安装处测量得到的高频信息较少。其他的区外故障与之类似,可得到相同的结论,故不再赘述。

3.2 小波包变换算法

本文利用边界元件处高低频暂态能量进行故障判别,需要对信号的高频成分进行分解。小波变换只会对信号的低频成分进行分解,而小波包分解弥补了这一缺陷,是对信号的近似系数与细节系数都进行分解。

设信号 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $\{2^{-j/2} \mu_n(2^{-j}t - k) | k \in \mathbf{Z}\}$ 为小波包子空间 U_n^j 上的规范正交基,则小波包子空间 U_n^j 的投影和小波包系数分别为

$$\left. \begin{aligned} P_x(t) &= \sum_{p \in \mathbf{Z}} x_j^n(p) 2^{-j/2} \mu_n(2^{-j}t - p) \\ x_j^n(p) &= \langle P_x(t), 2^{-j/2} \mu_n(2^{-j}t - p) \rangle = \\ &\langle x(t), 2^{-j/2} \mu_n(2^{-j}t - p) \rangle \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: j 为尺度; n 为小波包节点序号; $\mu_n(t)$ 为小波包; $\langle \rangle$ 为求均值。式(6)为内积型小波包变换。内积型小波包导致了快速算法中的隔二抽一采样,各分解序列长度递减。卷积型小波包变换没有隔点采样环节,克服了小波包中由于隔二抽一而产生的频率折叠、信号失真、平移可变等^[23]。卷积型小波包定义如下:设信号 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $\{2^{-j/2} \mu_n(2^{-j}t - p) | k \in \mathbf{Z}\}$ 为小波包子空间 U_n^j 上的规范正交基,则信号 $x(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 的卷积型小波包变换为

$$\left. \begin{aligned} x_n(p) &= \frac{1}{2^j} \int_{\mathbf{R}} x(t) \mu_n\left(\frac{p-t}{2^j}\right) dt \\ 0 &\leq j \leq S; 0 \leq n < 2^S \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 S 为最大分解层数。

采用卷积定理,将式(7)转换到频域

$$\hat{x}_n^j(\omega) = \hat{x}(\omega) \hat{\mu}_n(2^j\omega) \quad (8)$$

式中 $\hat{x}(\omega)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换。

在小波包的定义式中,有

$$\left. \begin{aligned} \mu_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k) \mu_n(2t - k) \\ \mu_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g(k) \mu_n(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $h(k)$ 与 $g(k)$ 为小波滤波器组。

在式(9)中,令 $t = 2^{-j}x$, 然后两端分别做傅立叶变换,得到

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mu}_{2n}(2^j\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in \mathbf{Z}} h(k) e^{-i2^{j-1} \omega k} \hat{\mu}_n(2^{j-1}\omega) \\ \hat{\mu}_{2n+1}(2^j\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n \in \mathbf{Z}} g(k) e^{-i2^{j-1} \omega k} \hat{\mu}_n(2^{j-1}\omega) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{令 } G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g(k) e^{-i\omega k}, H(\omega) =$$

$\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k) e^{-i\omega k}$, 则式(10)变为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mu}_{2n}(2^j\omega) &= H(2^{j-1}\omega) \hat{\mu}_n(2^{j-1}\omega) \\ \hat{\mu}_{2n+1}(2^j\omega) &= G(2^{j-1}\omega) \hat{\mu}_n(2^{j-1}\omega) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

考虑到 $H(\omega)$ 的定义,并结合式(8)(11)可得

$$\begin{aligned} \hat{x}_{2n}^{j+1}(\omega) &= \hat{x}(\omega) \hat{\mu}_{2n}(2^{j+1}\omega) = \\ \hat{x}(\omega) H(2^j\omega) \hat{\mu}_n(2^j\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k) e^{-i2^j \omega k} \hat{x}_n^j(\omega) \end{aligned}$$

转换到时域,得到

$$x_{2n}^{j+1}(p) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k) x_n^j(p - 2^j k) \quad (12)$$

从而可得到 $x_{2n}^{j+1}(p)$ 的迭代计算式。如此,得到卷积型小波包变换的快速分解算法

$$\left. \begin{aligned} x_{2n}^{j+1}(p) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) x_n^j(p - 2^j k) \\ x_{2n+1}^{j+1}(p) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) x_n^j(p - 2^j k) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

利用小波包变换,得到不同频段下的小波包系数,由此得到小波包能量

$$E_{i,j} = \sum_{k=1}^N |x_{j,k}|^2 \quad (14)$$

式中: $x_{j,k}$ 表示小波包系数, $j=0,1,2,\cdots,2^i-1,k=1,2,\cdots,N$; N 表示离散采样点数; $E_{i,j}$ 表示故障信号通过小波包分解得到的第 i 层第 (i,j) 个节点的能量。

3.3 小波包变换参数

本文采用 $100\ \mu\text{s}$ 的采样周期,即 $10\ \text{kHz}$ 的采样频率。在实际的工程中,采样频率达到 $2\ \text{kHz}$ 以上就可以提取有用的故障信息。小波包分解的层数为 3,各节点是按照频率从高到低分布,共分解为 8 个节点。通过奈奎斯特采样定律可知,采样信号最高频率是 $5\ \text{kHz}$,将其分解为 8 个频段,各节点的频率段分布如表 1 所示。

表 1 小波包分解第 3 层各节点对应的频率段

Table 1 Wavelet packet decomposition frequency band corresponding to each node of layer 3

节点	频率段/Hz	节点	频率段/Hz
1	0~625	5	2 500~3 125
2	625~1 250	6	3 125~3 750
3	1 250~1 875	7	3 750~4 375
4	1 875~2 500	8	4 375~5 000

4 基于能量分布的单端电气量保护

本文利用混合双极直流输电线路两侧固有的平波电抗器,构造了一种基于边界元件暂态能量之比的单端电气量保护方案。通过对保护安装处提取的电压特征信号进行小波包变换,获得各节点的小波包分解系数,利用式(14)得到各频段暂态能量。由于电感通低频阻高频的特性,所以利用低频能量与部分高频能量和的比值构造出保护判据,识别区内外故障进行故障选极。

4.1 保护启动

根据故障后的电压变化量幅值构造出启动判据

$$|\Delta U| > 0.1 U_n \quad (15)$$

式中: ΔU 是正负极的电压变化量; U_n 是电压额定值。如果保护安装处测量的数据满足式(15),则保

护启动;如果不满足,则保护不启动。

4.2 故障判据

通过 3.1 小节分析可得,保护测量点得到的电压高频能量大,区外故障时测量点得到的电压高频能量较小,导致高低频能量的比值不同。由此,构造保护判据

$$\left. \begin{aligned} K_a &= E_{La}/E_{\Sigma Ha} < K_{\text{set}} \\ K_b &= E_{Lb}/E_{\Sigma Hb} < K_{\text{set}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: K_a 、 K_b 分别表示正极、负极的高低频能量之比; E_{La} 表示在正极保护安装处 a 测量得到的电压信号经小波包 3 层变换后的第 2 个节点能量; $E_{\Sigma Ha}$ 表示在正极保护安装处 a 测量得到的数据经小波包 3 层变换得到的第 3 层后 6 节点能量之和; K_{set} 为保护设定的门槛值。

选取区内故障的保护整定值时,保证其可以避免所有的区外故障即可。由大量仿真数据可知,发生区内外故障时,能量比存在明显的分界。因此,在一定的裕值下,选取 $K_{\text{set}}=3$ 。

最终,保护的判据设置如下:

区内正极故障, $K_a < 3 \ \& \ K_b > 3$;

区内负极故障, $K_a > 3 \ \& \ K_b < 3$;

区内双极故障, $K_a < 3 \ \& \ K_b < 3$;

区外故障, $K_a > 3 \ \& \ K_b > 3$ 。

4.3 保护流程

保护算法流程如图 7 所示,先判断是否发生故障,保护是否启动,若是,则对测量得到的数据进行小波包变换,求取各节点能量,求取高低频能量比,从而判别区内外故障以及进行故障选极。

此外,雷击的数据采集时间窗长度是微秒级,而本文方法的数据采集时间窗长度是毫秒级。理论上,本文方法受雷击影响小,未来会专门研究雷击影响问题。

5 仿真验证与分析

本文选择的电缆长度是 $200\ \text{km}$,电压等级是 $\pm 500\ \text{kV}$,故障发生时刻是 $3\ \text{s}$,持续时间是 $0.1\ \text{s}$,数据窗长度是 $3\ \text{ms}$,采样周期是 $100\ \mu\text{s}$ 。

5.1 区内故障

当线路发生区内故障时,在不同接地故障和过渡电阻下,正极的高低频能量比 K_a 与负极的高低频能量比 K_b 如表 2 所示。

图 8 是区内正极故障时不同过渡电阻下的 K_a 、 K_b 。可以看出,保护安装处 a 测量得到的 K_a 均小于 3,保护安装处 b 测量得到的 K_b 均大于 3。区内

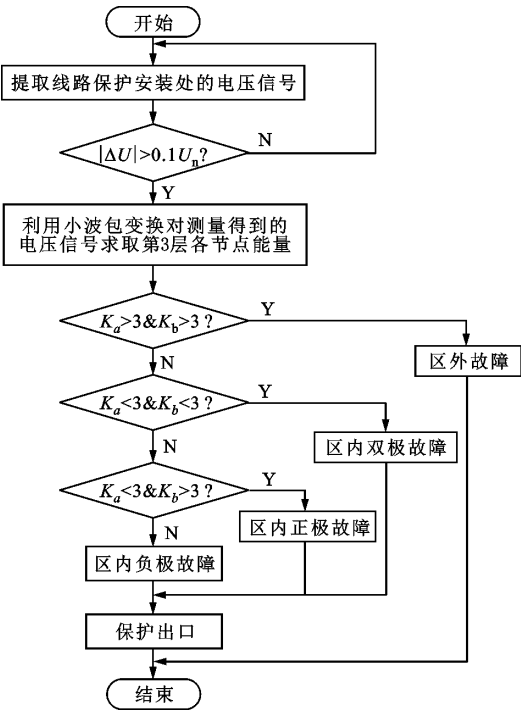


图 7 保护算法流程
Fig. 7 Diagram of protection flow

正极故障保护判据的有效性得到了验证。

表 2 区内故障时的 K_a 和 K_b

Table 2 K_a and K_b for internal faults

过渡电阻 /Ω	故障类型	K_a	K_b	过渡电阻 /Ω	故障类型	K_a	K_b
0.01	f_2	0.35	3.31	500	f_2	1.95	3.40
	f_3	0.33	3.95		f_3	1.56	3.97
	f_6	17.15	0.32		f_6	15.54	1.47
	f_7	16.34	0.41		f_7	14.87	0.88
	f_9	1.19	0.22		f_9	1.43	0.83
100	f_2	1.46	3.65	1 000	f_2	2.67	3.33
	f_3	1.22	4.03		f_3	2.37	3.82
	f_6	15.85	1.27		f_6	15.31	1.58
	f_7	16.51	0.64		f_7	15.33	0.86
	f_9	1.27	0.48		f_9	1.50	0.93
300	f_2	1.70	3.48		f_2		
	f_3	1.45	4.42		f_3		
	f_6	15.72	1.40		f_6		
	f_7	16.04	0.82		f_7		
	f_9	1.41	0.75		f_9		

图 9 是区内负极故障时不同过渡电阻下的 K_a 、 K_b 。可以看出,保护安装处 a 测量得到的 K_a 均大于 3,保护安装处 b 测量得到的 K_b 均小于 3。区内负极故障保护判据的有效性得到了验证。

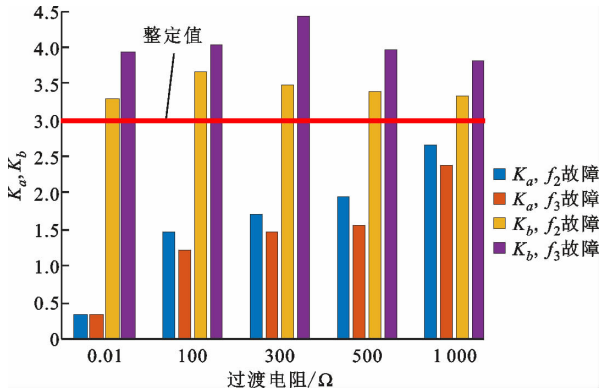


图 8 区内正极故障时不同过渡电阻下的 K_a 和 K_b
Fig. 8 K_a and K_b values at different transition resistances for internal positive pole faults

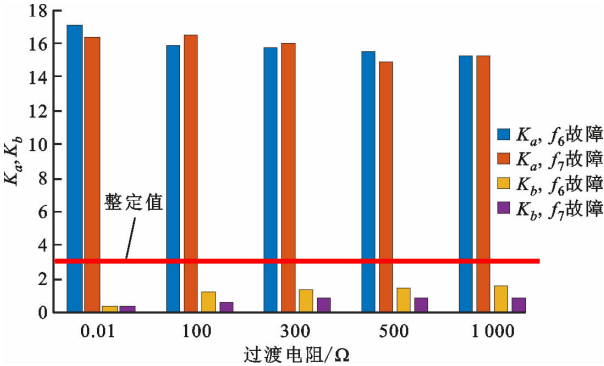


图 9 区内负极故障时不同过渡电阻下的 K_a 和 K_b
Fig. 9 K_a and K_b values at different transition resistances for internal negative pole faults

图 10 是双极故障(f_9)时不同过渡电阻的 K_a 、 K_b 。可以看出,在保护安装处 a 测量得到的 K_a 均小于 3,在保护安装处 b 测量得到的 K_b 均小于 3。区内双极故障保护判据的有效性得到了验证。

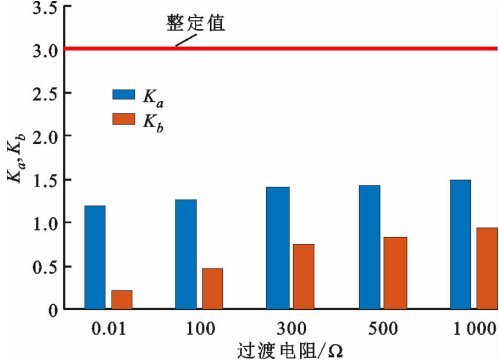


图 10 双极故障时不同过渡电阻的 K_a 和 K_b
Fig. 10 K_a and K_b values at different transition resistances in the case of bipolar fault

5.2 区外故障

保护判据的整定是按躲过最严重的区外故障来

进行的,区外金属性接地与区内高阻接地故障最接近,因此若保护能成功避开区外金属性接地故障,即可保证可以躲过其他区外故障。当发生区外故障时,过渡电阻取 $0.01\ \Omega$,发生 f_1 、 f_4 、 f_5 、 f_8 时的 K_a 为 5.31、10.94、13.89、17.06, K_b 为 4.76、9.86、5.15、9.30。可以看出,在保护安装处 a 测量得到的 K_a 均大于 3,在保护安装处 b 测量得到的 K_b 均大于 3。区外故障保护判据的有效性得到了验证。

5.3 故障选极

对于线路而言,一极故障,则另外一极也将受到影响。当发生单极故障时,故障极线路保护启动,保护元件动作,故障极被隔离,系统实现单极运行。当线路发生双极故障时,保护动作,系统无法继续工作。因此,区内故障最严重的就是双极故障。通过 PSCAD 搭建混合双极直流输电模型,对保护判据进行验证,结合 5.1、5.2 小节,可得仿真验证结果,如表 3 所示。

表 3 仿真验证结果

Table 3 Protection identification results

满足条件	故障类型	识别结果	保护出口
$K_a < 3 \& K_b > 3$	f_2	区内正极故障	a 、 c 动作
$K_a < 3 \& K_b > 3$	f_3	区内正极故障	a 、 c 动作
$K_a > 3 \& K_b < 3$	f_6	区内负极故障	b 、 d 动作
$K_a > 3 \& K_b < 3$	f_7	区内负极故障	b 、 d 动作
$K_a > 3 \& K_b > 3$	f_9	区内双极故障	a 、 b 、 c 、 d 动作

6 结 论

本文利用混合双极直流输电系统特有的边界结构,构造了一种基于信号暂态高低频能量比的直流线路故障判别方法。通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建混合双极高压直流输电系统,模拟不同工况下的故障情形,提取电压特征信号,进行小波包变换,得到各节点的暂态能量。利用特定低频能量与部分高频能量和的比值构造出保护判据,从而识别区内外故障以及进行故障选极。实验结果显示:

- (1)在不同的工况下,甚至在区内故障短路接地电阻为 $1\ 000\ \Omega$ 时,本文方法仍可以准确识别故障,满足保护的可靠性;
- (2)数据窗长度只有 3 ms,满足继电保护的速动性;
- (3)本文方法保护的是直流线路全长,满足保护的灵敏性;
- (4)本文方法可以快速识别故障,并自动进行故

障选极,满足了保护的选择性。

本文方法具有较强的耐过渡电阻能力,保护的可靠性、速动性、灵敏性和选择性都得到了满足,且具有较高的精度,可以准确识别故障。

参考文献:

[1] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化,2012,36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.

[2] 宋国兵,高淑萍,蔡新雷,等. 高压直流输电线路继电保护技术综述 [J]. 电力系统自动化,2012,36(22): 123-129.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.

[3] 高锡明,张鹏,贺智. 直流输电线路保护行为分析 [J]. 电力系统自动化,2005,29(14): 96-99.

[4] 冯明,李兴源,李宽. 混合直流输电系统综述 [J]. 现代电力,2015,32(2): 1-8.
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan. A review on hybrid HVDC system [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8.

[5] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述 [J]. 电力系统保护与控制,2015,43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[6] 胡竞竞,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述 [J]. 电网技术,2014,38(4): 844-851.
HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.

[7] 高本锋,刘辛晔,张云晓,等. 高压直流输电线路行波特性与保护定值整定 [J]. 电力系统自动化,2015,39(16): 120-125.
GAO Benfeng, LIU Xinye, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics and protection value setting of traveling wave on HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 120-125.

[8] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, WU Zhongyu, et al. Harmonic current protection scheme for voltage

- source converter-based high-voltage direct current transmission system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(9): 1509-1515.
- [9] 王钢, 罗健斌, 李海锋, 等. 特高压直流输电线路暂态能量保护 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 28-31.
- WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection for ± 800 kV UHVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 28-31.
- [10] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49.
- [11] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- [12] XIANG Wang, YANG Saizhao, XU Lie, et al. A transient voltage-based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 334-345.
- [13] DESCLOUX J, RAISON B, CURIS J B. Protection algorithm based on differential voltage measurement for MTDC grids [C]//Proceedings of the 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). Stevenage, UK: IET, 2014: 1-5.
- [14] 罗澍忻, 董新洲. 基于故障行波过程的直流线路单端保护 [J]. 广东电力, 2016, 29(9): 52-57.
- LUO Shuxin, DONG Xinzhou. Single-end protection of DC transmission lines based on fault travelling wave process [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(9): 52-57.
- [15] 谢秋霞. 基于 MMC 的直流电网架空线路故障暂态特性分析及快速保护 [J]. 机电工程技术, 2018, 47(6): 134-139.
- XIE Qiuxia. Fault transient characteristic analysis and fast protection of overhead lines in MMC-based HVDC grids [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(6): 134-139.
- [16] 张举, 张晓东, 林涛. 基于小波变换的行波电流极性比较式方向保护 [J]. 电网技术, 2004(4): 51-54.
- ZHANG Ju, ZHANG Xiaodong, LIN Tao. A directional protection based on traveling wave current polarity comparison using wavelet transform [J]. Power System Technology, 2004(4): 51-54.
- [17] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 134-139, 153.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 134-139, 153.
- [18] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.
- XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.
- [19] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission [C]//Proceedings of the 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-16.
- [20] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 97-114.
- [21] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 14-23.
- [22] 李小鹏, 汤涌, 滕予非, 等. 基于反行波幅值比较的高压直流输电线路纵联保护方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3095-3101.
- LI Xiaopeng, TANG Yong, TENG Yufei, et al. Pilot protection method based on amplitude comparison of backward traveling wave for HVDC transmission lines [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3095-3101.
- [23] 田福庆, 罗荣, 李万, 等. 改进的卷积型小波包分解及在故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(3): 89-95.
- TIAN Fuqing, LUO Rong, LI Wan, et al. Improved convolution-type wavelet packet decomposition with applications to fault diagnosis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(3): 89-95.

(编辑 陶晴)