

一种 ± 500 kV 混合双极高压直流输电线路保护的新方法

高淑萍¹, 叶换飞^{1,2}, 宋国兵³, 张楚¹, 牛丹¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 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: 针对混合高压直流输电线路距离长、故障率高的问题,提出了一种适用于 ± 500 kV 的混合直流输电线路的保护方法。根据混合双极高压直流输电线路边界元件两侧的信号高低频能量不同,同时考虑到故障类型以及过渡电阻对诊断结果的影响,构造了有功功率故障分量的暂态能量比值的保护方法。该方法利用小波包变换对有功功率故障分量分解,得到各节点暂态能量;利用正、负极能量比值的大小区分区内、外故障,根据正、负极能量比值的差值区分单、双极故障,并利用正、负极部分频带能量和进行故障选极。采用电磁仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建 ± 500 kV 混合双极高压直流输电系统仿真模型,并利用 MATLAB 结合保护判据进行保护算法的仿真验证,结果表明:所提方法耐过渡电阻能力高,数据采集时间窗为 3 ms,在不同的工况下都可以快速、准确识别区内外故障,并具有故障选极功能。

关键词: 混合双极高压直流输电;继电保护;有功功率故障分量;暂态能量;小波包变换

中图分类号: TM773;TM75 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202006005 **文章编号:** 0253-987X(2020)06-0036-08



OSID 码

New Protection Method of ± 500 kV Hybrid Bipolar High-Voltage DC Transmission Line

GAO Shuping¹, YE Huanfei^{1,2}, SONG Guobing³, ZHANG Chu¹, NIU Dan¹

(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: Aiming at the problems of long distance and high failure rate of hybrid bipolar high voltage direct current (HVDC) transmission lines, a relay protection method suitable for ± 500 kV hybrid DC transmission lines is proposed. According to the different high and low frequency energy of the signals on the two sides of the boundary element of the hybrid bipolar HVDC transmission line, and considering the type of fault and the influence of the transition resistance on the result, a protection scheme for the transient energy ratio of the active power fault component is constructed. This method adopts wavelet packet transform to decompose the active power fault component to obtain the transient energy of each node. The positive and negative energy ratios are used to distinguish between internal and external faults, the differences between positive and negative energy ratios are taken to distinguish single faults from bipolar ones, and the positive and negative part of the frequency band energy sum is applied to fault selection. The

收稿日期: 2019-10-28。 作者简介: 高淑萍(1970—),女,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777166);国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U1766209)。

网络出版时间: 2020-02-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200218.2022.002.html>

electromagnetic simulation software PSCAD/EMTDC is chosen to constructed a ± 500 kV hybrid bipolar HVDC transmission system simulation model, and MATLAB is used to combine the protection criteria to perform the simulation verification of the protection algorithm. This proposed method is endowed with high resistance to transient resistance and a data acquisition time window of 3 ms, which enables to quickly and accurately identify internal and external faults under different operating conditions with a fault pole selection function.

Keywords: hybrid bipolar high-voltage direct current transmission system; relay protection; active power fault component; transient energy; wavelet packet transform

由于我国资源分布与负荷需求量不均匀,“西电东送”等政策应运而生,因直流输电传输距离远,传输容量大等特点,成为研究热点^[1]。据不完全统计,到2020年,我国建设的基于电网换相换流器的高压直流输电(LCC-HVDC)可达到38项,目前投运的基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)输电工程有20项,可见对于单一运行方式的高压输电工程我国已具备较成熟的技术^[2-3]。为了解决传统直流输电换相失败的问题,近几年兴起了混合直流输电方式,可以将单一输电方式的优点结合,使其性能更加强大。例如,双端直流系统一端是LCC-HVDC,一端是VSC-HVDC,可以向弱交流系统供电,参与大停电以后的恢复过程,而且投资成本相对较低,可靠性较高。然而对于混合输电方面,尽管也有项目投入运行,但技术还不太成熟,而且柔性直流输电系统阻抗小,故障电流攀升快^[4-6]。因此,非常有必要研究一种较高可靠性的故障识别方法,在较短时间内诊断出故障,以保证混合直流输电系统安全运行。

目前,国内传统高压直流输电线路的保护方法主要是以行波保护为主,差动保护为辅^[7-10]。传统意义上的行波保护可靠性差,耐过渡电阻能力不高,因此需要研究更高性能的保护方法。文献[11-12]利用边界元件特性,通过利用小波变换提取区内、外故障的电流暂态高频能量识别故障,但都仅对高频信号进行提取分解。文献[13]根据平波电抗器和直流滤波器组的幅频特性,构造单端暂态电压量保护方法,该方法可靠性较高,但耐过渡电阻不高。文献[14-15]利用电压故障分量和电流故障分量的极性识别故障,理论上不受过渡电阻和采样数据同步的影响。文献[16]提出了虚拟有功功率的概念,通过分析区内、外虚拟有功功率的差异,构造了虚拟有功功率差动保护方法;文献[17]利用暂态功率的方向极性进行小电流接地系统的保护;文献[18]利用有功功率故障分量区内、外极性的不同识别故障。然

而,文献[16-18]使用的有功功率故障分量目前大多用于交流系统的故障识别中,其本质是对有功功率极性的研究,没有研究故障发生后能量的变化。

基于文献[16-18],本文搭建±500 kV的混合双极直流输电模型,设置故障类型,提出利用平波电抗器两侧的有功功率故障分量暂态能量的不同,整定保护判据,识别区内、外故障以及故障选极。仿真结果表明,该方法采样数据窗为3 ms,耐过渡电阻能力强,能满足保护的选择性和快速性等要求。

1 混合双极高压输电系统

图1为混合双极高压直流输电系统结构及故障位置。该系统直流电压为±500 kV,正极采用LCC-HVDC,换流单元由2组12脉冲换流器串联构成,负极采用基于模块化多电平换流器的高压有流输电(MMC-HVDC)。正极的控制主要是整流侧采用定直流电流控制,逆变侧采用定关断角控制;负极的控制方法主要是整流侧采用定直流电压和定交流电压,逆变侧采用定直流电流和定交流电压。

2 保护原理及算法

2.1 区内、外有功功率故障分量的暂态能量比较

本文利用系统边界元件的通低频、阻高频的特性,构造了基于有功功率故障分量的暂态能量比保护方案。由叠加原理,定义有功功率故障分量 ΔP 为电压故障分量 ΔU 与电流故障分量 ΔI 的乘积。

(1)正常运行。当系统正常运行时,系统的等效电路见图2。图中, I_a 、 U_a 分别表示直流线路整流侧的电流、电压, I_c 、 U_c 分别表示为直流线路逆变侧的电流、电压。若直流系统正常运行时的电流、电压为 I_z 、 U_z ,得

$$I_a = I_z; I_c = -I_z; U_a = U_c = U_z \quad (1)$$

(2)区内故障。当线路发生区内故障时,利用叠加原理得到各故障附加网络。叠加定理适用于线性电路,非线性电路不能采用叠加定理,但是故障发生

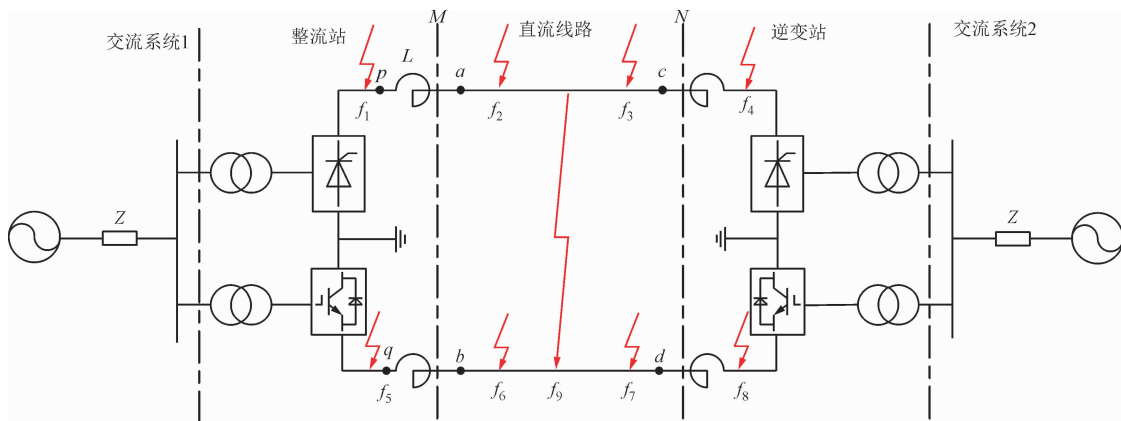


图1 混合双极高压直流输电系统结构及故障位置

M 、 N —线路两端； a 、 b 、 c 、 d —区内线路保护安装处； p 、 q —整流侧正极和负极出口处测量电压和电流的位置； Z —交流侧等值阻抗； L —平波电抗器； f_1 —整流侧正极直流线路出口处区外故障； f_2 、 f_3 —靠近整流侧10%、90%的区内故障； f_4 —逆变侧正极直流线路出口处区外故障； f_5 、 f_6 、 f_7 、 f_8 —与正极对应，为负极相应的故障； f_9 —区内双极短路故障。

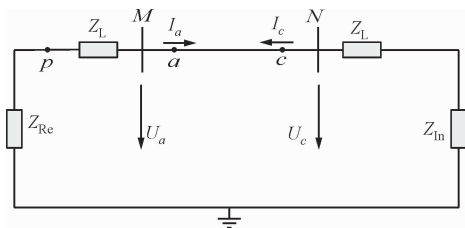
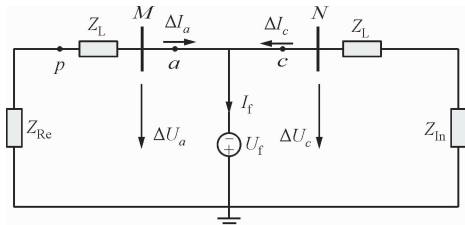


图2 系统正常运行等效图

时刻($t=0$)，调节器未参与调整之前，可用叠加定理。以区内正极故障 f_2 为例，图3所示为故障 f_2 的附加网络图。当线路发生区内故障时，故障点相当于叠加了一个负电源。图3中， ΔI_a 、 ΔU_a 分别表示直流线路整流侧的电流故障分量、电压故障分量， ΔI_c 、 ΔU_c 分别表示为直流线路逆变侧的电流故障分量、电压故障分量。

图3 区内正极故障 f_2 的附加网络

由图3可得

$$\Delta I_a = I_a - I_z; \Delta U_a = U_a - U_z \quad (2)$$

由此可得，整流侧保护安装处测量得到的有功功率故障分量为

$$\Delta P_a = \Delta U_a \Delta I_a \quad (3)$$

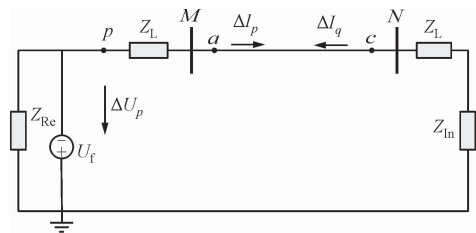
行波的流向为由故障点流向线路两侧^[19]，即先流过 a 处，再经过平波电抗器到达 p 处。由平波电

抗器通低频、阻高频的特性可知，区内故障时流过保护安装处 a 和 p 的暂态能量的关系为

$$E_{Pa} > E_{Pp} \quad (4)$$

式中： E_{Pa} 、 E_{Pp} 分别表示 a 处、 p 处的有功功率故障分量的暂态能量。由此可见，当线路发生区内故障时，保护安装处测量得到的高频暂态能量较大。其他的区内故障分析与之类似。

(3)整流侧直流线路区外故障。当线路发生区外故障时，本文选取的是与区内故障最相近的整流侧直流线路区外故障。以故障 f_1 为例，其故障附加网络图如图4所示。

图4 整流侧直流出口处区外故障 f_1 的附加网络

由图4可得

$$\Delta I_p = I_p - I_z; \Delta U_p = U_p - U_z \quad (5)$$

由此得区外故障时有功功率故障分量为

$$\Delta P_p = \Delta U_p \Delta I_p \quad (6)$$

故障发生后，行波从故障点流向线路两侧，即先流经点 p ，之后经过平波电抗器到达点 a ，可得点 p 和点 a 的暂态能量的关系为

$$E_{Pa} < E_{Pp} \quad (7)$$

由此可见，当线路发生区外故障时，保护安装处测量得到的暂态能量较小。其他的区外故障分析与之类似，由于文章篇幅有限，在此不再赘述。

2.2 小波包变换算法

小波分析在低频段的频率分辨率较高,在高频段较低,无法精细的分解信号,获取感兴趣频段的信号信息。为了克服这一缺点,在小波分析的基础上提出了小波包分析,它能对信号的低频带和 高频带均进行细分,大大提高了信号的时频分辨率^[20]。

目前,由于小波包分析在处理非平稳信号方面 优于小波分析,对故障信号的分解既无冗余也无遗 漏,获取的故障特征明显,已有诸多学者将小波包分 解应用到电力系统中来,如变压器故障和三电平变 换器故障诊断。但是,将小波包分析用于处理 HVDC 故障信号并应用到故障诊断系统的研究并 不多,有必要对相关的分析和应用方法进一步探索, 这对于 HVDC 故障分析方面有着开拓性意义。

综上所述,本文采用了小波包变换对信号的高 低频都进行多层次分解,提高了时频分辨率。本文 采用的小波包变换分解层数 $n=3$,小波基的选取对 最终试验数据也有影响,本文经过比较,最终选取的 小波基为 db3。

小波函数 $\Psi_{ab}(t)$ 定义为

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{8}$$

式中: a 为尺度参数; b 为位置参数。

小波包分解算法为

$$d_l^{j,2n} = \sum_k h_{k-2l} d_k^{j+1,n}; d_l^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2l} d_k^{j+1,n} \tag{9}$$

式中: j 为尺度; k 为频带; n 为该点的时域位置。
定义第 i 层小波包分解的各频带能量为小波包 系数沿时间轴的积分,表示为

$$E_i = \sum_{k=1}^N |W(i,j)|^2 \tag{10}$$

式中: E 指的是变换能量; $W(i,j)$ 为小波包分解后 的小波包系数; N 采样点数。图 5 为小波包分解树 状图。

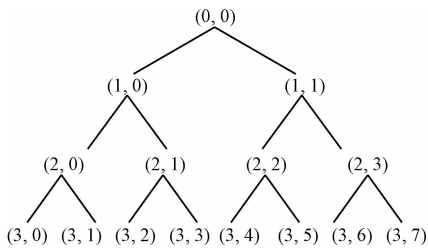


图 5 小波包分解数状图

本文利用 PSCAD 暂态仿真软件搭建了±500 kV 混合双极直流输电的模型,用以输出故障数据,

采样频率为 10 kHz,采样周期为 100 μs。利用 MATLAB 对故障数据进行处理,小波包分解第 3 层各节点数据按照频率的高低从小到大分布,共 $2^3=8$ 个节点,频率分布见表 1。

表 1 小波包分解第 3 层各节点对应的频率段

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

3 单端电气量保护

根据 2.1 节分析可知,当发生区内故障时,保护 测量处得到的有功功率故障分量的高频能量较大, 而区外故障时,相应得到的较小。因此,本文利用混 合双极直流输电线路边界元件两侧的高低频能量的 不同,构造了一种基于有功功率故障分量的高低频 能量比值的单端电气量保护方案,从而识别区内、外 故障,并实现故障选极。

3.1 保护启动

根据故障后电压变化量的幅值构造启动判据, 表示为

$$|\Delta U| > 0.1U_n \tag{11}$$

式中: ΔU 为正极或负极电压变化量,等于电压瞬时 值减去其 1 ms 之前的值; U_n 为电压额定值,针对本 文而言,即为 500 kV。若保护安装处测量得到的数 据满足式(11),则保护启动;反之,保护不启动。

3.2 故障判据

3.2.1 区内外故障识别 由 2.1 节可见,区内故障 时保护安装处测量得到的有功功率故障分量的高频 能量较高,而经过边界元件的区外故障能量较低,导 致高、低频能量的比值不同。利用小波包变换算法 对 ΔP 进行 3 层处理,得到了 ΔP 在不同频带的能 量值。由于第 1、2 层节点是低频能量,含量高,与第 3~8 层节点的能量不是一个数量级,为使对比结果 明显,因此忽略第 1、2 层能量,将第 3 层作为低频能 量。由于传输距离、滤波、补偿装置的参数、配置等, 系统对节点的高频能量起衰减作用,因此测量得到 的高频能量幅值较小。为使结果明显,将第 3~6 层 能量和作为高频能量,以此构成保护判据。令

$$K_P = \Delta P_{3P}/\Delta P_{\Sigma P}; K_N = \Delta P_{3N}/\Delta P_{\Sigma N} \tag{12}$$

式中: ΔP_{3P} 、 ΔP_{3N} 分别为正极、负极保护安装处测量 得到的有功功率故障分量,经 3 层小波包变换得到

的图5中节点(3,2)的能量值; $\Delta P_{\Sigma P}$ 、 $\Delta P_{\Sigma N}$ 分别为正极、负极保护安装处测量得到的有功功率故障分量,经3层小波包变换得到的图5中第3~6节点的能量和; K_P 、 K_N 分别为正极、负极对应能量的比值。考虑到系统运行方式、拓扑结构、控制方式等因素,最终区内、外判据选择为

$$K_P > 0.4; K_N > 0.5 \quad (13)$$

满足式(13)为区外故障;反之,为区内故障。

3.2.2 单、双极故障识别 当线路发生单极故障时,由于线路的耦合作用,导致健全极也受到影响,但是故障极和健全极在能量波动的幅值上还是有明显区别的,二者相差较大;当线路发生双极故障时,两条线路均为故障极,故障对二者都产生较大影响,二者之间相差较小。同时,根据区内、外故障时,保护安装处测量得到的有功功率故障分量高低频能量不同,构造的保护判据为

$$|K_P - K_N| > K_{\text{pole}} \quad (14)$$

式中: K_{pole} 表示单双极故障的整定值。经过大量的仿真试验,可见系统发生单双极故障时,正负极的能量比值具有非常明显的差异。因此,在留有一定裕值的情况下,保护的整定值选取为

$$K_{\text{pole}} = 0.05 \quad (15)$$

即,当发生单极故障时, $|K_P - K_N| > 0.05$;当发生双极故障时, $|K_P - K_N| < 0.05$ 。

3.2.3 单极故障时的故障选极 线路耦合作用导致健全极也会受到故障极的影响,因此需要准确判断出故障极,切除故障,减少故障对系统的影响。当发生单极故障时,尽管健全极会受影响,但健全极和故障极在能量波动上还是有明显的区别。因此,构造正、负极故障保护判据为

$$\Delta P_{\Sigma P} > \Delta P_{\Sigma N} \quad (16)$$

满足式(16)时为正极故障;反之,为负极故障。

3.3 保护流程

保护算法实现流程见图6,先进行保护启动判据,若否则返回,继续采集数据;判断若是,利用小波包变换对保护测量处的数据进行处理,得到不同节点能量,进行区内、外故障识别,实现故障选极。

4 仿真验证与分析

本系统选取的线路长度为200 km,故障发生时间为3 s,故障持续时间为0.1 s,数据窗为3 ms,采样时间为100 μs ,采样频率为10 kHz。

4.1 区内、外故障仿真结果

在识别区内、外故障时,以最严重的情况进行整

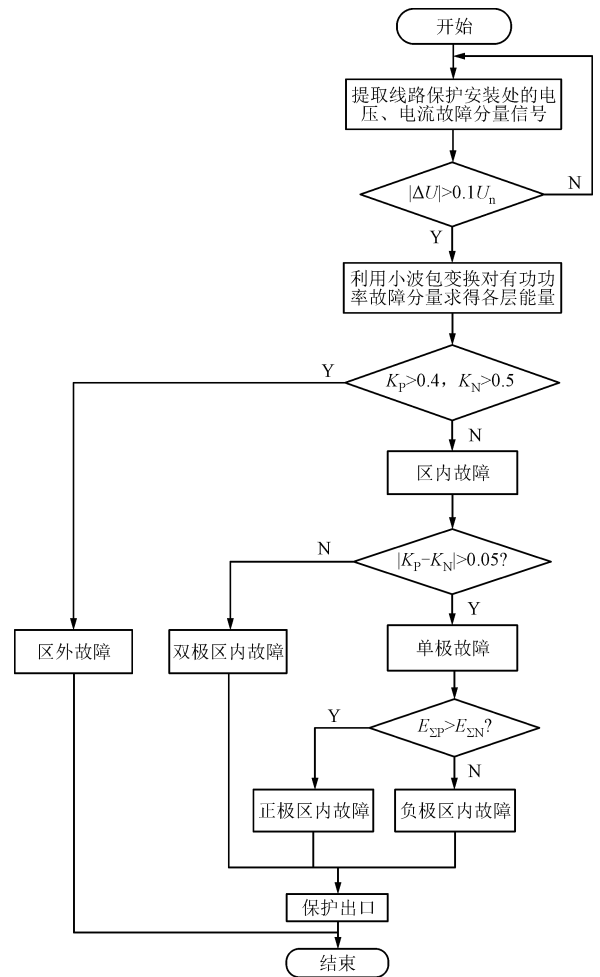


图6 保护算法流程图

定,即区内故障躲过最严重的区外金属性接地故障,此处金属性接地的过渡电阻用0.01 Ω 模拟。因此,区外故障 f_1 、 f_4 、 f_5 、 f_8 仅测了过渡电阻为0.01 Ω 时的值。区外故障可分为交流侧故障和换流器出口处直流线路故障,由于后者与区内故障仅隔一个平波电抗器,故障信息更为接近,识别较困难,所以本文选取的区外故障为换流器出口处直流线路故障。

4.1.1 正极区内、外故障仿真结果 模拟正极不同的过渡电阻、故障得到表2数据,结合区内、外故障的保护判据,判断结果见图7。

表2 不同过渡电阻下正极仿真数据

故障类型	K_P	故障类型	K_P
$f_1(0.01)$	0.48	$f_3(0.01)$	0.20
$f_2(0.01)$	0.07	$f_3(500)$	0.25
$f_2(500)$	0.13	$f_3(1\ 000)$	0.35
$f_2(1\ 000)$	0.28	$f_4(0.01)$	0.55

由图7看到, f_1 、 f_4 的值大于0.4,由式(13)可得, f_1 、 f_4 为区外故障,其余故障为区内故障。

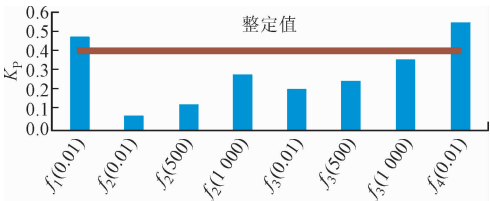


图 7 正极区内、外故障图

4.1.2 负极区内、外故障仿真结果 当负极线路发生故障时,同样可得表 3 的数据。结合负极区内外故障的保护判据,识别结果见图 8。由图 8 看到, f_5 、 f_8 的值大于 0.5,由式(13)可得, f_5 、 f_8 为区外故障,其余故障为区内故障。

表 3 不同过渡电阻下负极仿真数据

故障类型	K_N	故障类型	K_N
$f_5(0.01)$	0.59	$f_7(0.01)$	0.21
$f_6(0.01)$	0.07	$f_7(500)$	0.46
$f_6(500)$	0.19	$f_7(1\ 000)$	0.41
$f_6(1\ 000)$	0.28	$f_8(0.01)$	0.54

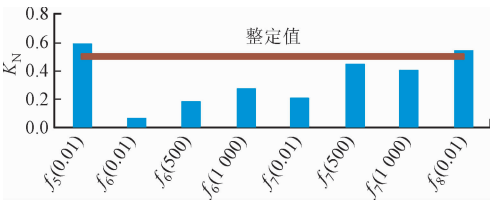


图 8 负极区内、外故障图

综上所述,区内、外故障识别的结果如表 4 所示。由表 4 可知,区内、外故障识别结果准确。

表 4 区内、外故障识别结果

故障类型	识别结果	故障类型	识别结果
$f_1(0.01)$	区外故障	$f_5(0.01)$	区外故障
$f_2(0.01)$	区内故障	$f_6(0.01)$	区内故障
$f_2(500)$	区内故障	$f_6(500)$	区内故障
$f_2(1\ 000)$	区内故障	$f_6(1\ 000)$	区内故障
$f_3(0.01)$	区内故障	$f_7(0.01)$	区内故障
$f_3(500)$	区内故障	$f_7(500)$	区内故障
$f_3(1\ 000)$	区内故障	$f_7(1\ 000)$	区内故障
$f_4(0.01)$	区外故障	$f_8(0.01)$	区外故障

4.2 单、双极故障仿真结果

当线路发生故障时,在线路保护安装 a 、 b 处测得的数据,经小波包 3 层变换后得到有功功率故障分量的暂态能量,取第 3 节点的能量与第 3~6 节点能量和的比值,作差、取绝对值,数据如表 5 所示。为了更加形象直观,将表 5 转化为图 9。

由图 9 观测到, f_9 的值均小于 0.05,由保护判据可知, f_9 为双极故障;其余故障的值均大于 0.05,均为单极故障。本文仅考虑双极区内故障,因此判定的结果若为双极故障,即指双极区内故障。

表 5 各故障在不同过渡电阻下能量比值的差值

过渡电阻/ Ω	$ K_P - K_N $				
	f_2	f_3	f_6	f_7	f_9
0.01	0.33	0.13	0.42	0.12	0.04
500	0.44	0.30	0.20	0.30	0.03
1 000	0.24	0.17	0.09	0.26	0.03

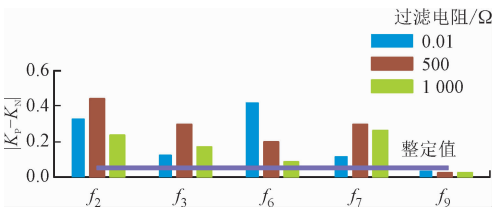


图 9 单双极故障识别图

4.3 故障选极仿真结果

若故障判定为双极区内故障,由于系统为双电源系统,所以线路两端的保护均动作;若故障判定为单极故障,则接下来进行故障选极,即故障发生在正极还是负极。经 PSCAD 搭建的仿真模型大量试验,得到数据如表 6 所示。由表 6 可知,由式(15)可得 f_2 、 f_3 为正极故障, f_6 、 f_7 为负极故障。

表 6 不同过渡电阻正、负极故障部分节点能量和

故障类型	$P_{\Sigma P}$	$P_{\Sigma N}$	故障类型	$P_{\Sigma P}$	$P_{\Sigma N}$
$f_2(0.01)$	38 249.08	265.24	$f_6(0.01)$	755.40	52 037.44
$f_2(500)$	509.19	11.01	$f_6(500)$	17.03	846.86
$f_2(1\ 000)$	147.04	8.39	$f_6(1\ 000)$	2.58	260.77
$f_3(0.01)$	898.32	0.49	$f_7(0.01)$	405.32	14 428.20
$f_3(500)$	13 939.58	499.57	$f_7(500)$	6.78	236.51
$f_3(1\ 000)$	125.72	15.68	$f_7(1\ 000)$	1.02	87.01

综上所述,结合式(15),正、负极故障识别结果如表 7 所示,从中可看出,正、负极识别结果准确。

表 7 正、负极故障识别结果表

故障类型	识别结果	故障类型	识别结果
$f_2(0.01)$	正极故障	$f_6(0.01)$	负极故障
$f_2(500)$	正极故障	$f_6(500)$	负极故障
$f_2(1\ 000)$	正极故障	$f_6(1\ 000)$	负极故障
$f_3(0.01)$	正极故障	$f_7(0.01)$	负极故障
$f_3(500)$	正极故障	$f_7(500)$	负极故障
$f_3(1\ 000)$	正极故障	$f_7(1\ 000)$	负极故障

4.4 故障验证结果

通过 PSCAD 搭建混合双极直流输电模型,对保护判据进行验证,可得表 8 结果。

表 8 仿真验证结果表

故障类型	识别结果	保护出口
f_1	正极区外故障	不动作
f_2	正极区内故障	$a、c$ 动作
f_3	正极区内故障	$a、c$ 动作
f_4	正极区外故障	不动作
f_5	负极区外故障	不动作
f_6	负极区内故障	$b、d$ 动作
f_7	负极区内故障	$b、d$ 动作
f_8	负极区外故障	不动作
f_9	双极区内故障	$a、b、c、d$ 动作

由表 8 可见:发生区外故障时,保护不动作;发生单极故障时,故障极线路保护动作,此时系统实现单极运行,可确保系统的稳定性;发生双极故障时,两条线路的保护均动作,此时系统瘫痪,无法继续运行。由此需要快速准确地判断识别区内外故障,确保在最短的时间内切断故障,减小故障对系统的影响,维持系统安全稳定运行。虽然目前混合双极直流输电模型在实际的工程中没有应用,无法从工程实际中获取数据进行验证,但是本保护方法反映了实际系统的暂态过程,具有一定的适用性。

5 结 论

针对传统保护方法的耐过渡电阻能力差,耗时久等特点,本文提出了一种适合于±500 kV 的混合双极直流输电的线路保护方法,利用小波包变换,提取有功功率故障分量的暂态能量,构造了一种基于有功功率故障分量的暂态能量之比的保护方案,该方案有以下特点。

(1)采用的故障特征信号为有功功率故障分量,实现故障识别,因此不需要考虑正常运行对故障识别的影响,方法简单,实现容易,满足保护的可靠性要求。

(2)本方案采样数据窗为 3 ms,可以实现对故障快速识别,可以减少故障对系统的危害,满足保护速动性的要求。

(3)本方案可以识别过渡电阻为 1 kΩ 时的故障,可见该方法耐过渡电阻能力高,满足保护灵敏性的要求,保护没有死区。

(4)本方案设定的保护判据可以准确识别故障

及进行故障选极,若为区内故障,则线路保护动作,切除故障,满足保护选择性的要求。

参考文献:

[1] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景 [J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Current status and development prospect of HVDC transmission technology [J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.

[2] 赵成勇,郭春义,刘文静,等. 混合直流输电 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-9.

[3] 宋国兵,靳幸福,李德坤,等. 识别模型参数的电压源换流器型直流输电线路纵联保护 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(8): 110-114.
SONG Guobing, JIN Xingfu, LI Dekun, et al. Novel pilot protection for voltage source converter high voltage direct current transmission lines by identifying model parameters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(8): 110-114.

[4] 索南加乐,孙成,杨铖,等. 双端带并联电抗器的输电线路纵联保护 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 99-103.
SUONAN Jiale, SUN Cheng, YANG Cheng, et al. Novel pilot protection for transmission line with shunt reactor at double terminal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 99-103.

[5] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. 利用电压相关性的±800 kV 直流输电线路区内外故障判断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 151-160.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Identification between internal and external faults of ±800 kV HVDC transmission lines based on voltage correlation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 151-160.

[6] 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. Fault identification method for high voltage direct current transmission line based on boundary feature [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.

[7] 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.
- [8] 张颖, 邵能灵, 徐斌. 高压直流线路纵联行波方向保护 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 77-81.
ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Travelling wave based pilot directional protection for HVDC Line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 77-81.
- [9] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission [EB/OL]. [2019-10-01]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4517192>.
- [10] ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, JANES S T, et al. A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmission line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(41): 2278-2285.
- [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.
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.
- [12] 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.
- [13] 张保会, 张篙, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient based protection for HVDC lines [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [14] 齐国强, 王增平. 基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变量方向纵联保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 92-99.
QI Guoqiang, WANG Zengping. Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 92-99.
- [15] 邢鲁华, 陈青, 高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 107-113.
XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113.
- [16] 黄家凯, 高厚磊, 彭放, 等. 输电线路虚拟有功功率差动保护 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 190-196.
HUANG Jiakai, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Virtual active power differential protection for transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 190-196.
- [17] 薛永端, 宋伊宁, 刘日亮, 等. 基于暂态功率方向的小电流接地故障处理技术 [J]. 供用电, 2018, 35(8): 3-8.
XUE Yongduan, SONG Yining, LIU Riliang, et al. The processing technology of single-phase earth fault based on the transient power direction in non-solidly earthed network [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 3-8.
- [18] 刘星, 黄家凯, 高厚磊, 等. 基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 206-211.
LIU Xing, HUANG Jiakai, GAO Houlei, et al. Active power polarity comparison type longitudinal protection based on fault component [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 206-211.
- [19] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [20] 刘飞, 陈皓勇. 基于小波包分解和广义回归神经网络的换相失败故障诊断 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017(6): 22-25.
LIU Fei, CHEN Haoyong. Fault diagnosis of commutation failures based on wavelet packet decomposition and generalized regression neural network [J]. Automation and Instruments, 2017(6): 22-25.

(编辑 杜秀杰 陶晴)