

引用格式: 高淑萍, 朱航舰, 叶换飞, 等. 基于纵向阻抗的混合双极直流输电线路保护新原理[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(14): 193-200
Gao Shuping, Zhu Hangjian, Ye Huanfei, et al. New principle of hybrid bipolar DC transmission line protection based on longitudinal impedance[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14): 193-200

基于纵向阻抗的混合双极直流输电线路保护新原理

高淑萍¹ 朱航舰¹ 叶换飞¹ 张保会² 宋国兵²

(西安科技大学电气与控制工程学院¹, 西安 710054; 西安交通大学电气工程学院², 西安 710049)

摘要 由于传统高压直流输电和柔性直流输电有各自的优缺点, 为了充分发挥二者的优势, 混合直流输电成为研究的热点。对由传统高压直流输电和柔性直流输电构成的混合双极直流输电线路的保护原理开展了研究, 将阻抗的概念进行扩展延伸, 提出了一种基于整流侧和逆变侧纵向阻抗的故障保护原理, 利用 PSCAD 搭建仿真模型, 利用 MATLAB 进行算法的仿真验证, 该纵向阻抗是整流侧和逆变侧两端电压故障分量的差与电流故障分量的和的比值, 利用纵向阻抗的幅值来区分区内故障。区内故障时, 纵向阻抗的幅值小于该极线路全长总阻抗; 区外故障时, 纵向阻抗的幅值大于该极线路全长总阻抗。该保护可以自行实现故障选极, 故障极的纵向阻抗幅值小于整定值, 非故障极的纵向阻抗幅值大于整定值。大量的仿真结果验证了所提保护原理的正确性, 并可以实现故障选极。

关键词 混合双极直流输电系统 继电保护 纵向阻抗 暂态分量
中图分类号 TM773; **文献标志码** A

自 1980 年以来, 中国开始建立传统高压直流 (line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC), 成功应用于实际电网中^[1-2]。但是 LCC-HVDC 受交流系统的影响较大, 容易发生换相失败, 且需要大量的无功补偿和滤波装置^[3-4]。由于电力电子器件在实际工程应用中越来越成熟甚至达到完美状态, 电压源换流器型高压直流输电 (voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC) 也建成了许多实际工程。VSC-HVDC 具有以下优点^[5-7]: 不会发生换相失败, 可以独立地控制有功和无功, 起到静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 的作用, 可以使交流系统电压稳定在一定的范围内^[8-9]。LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 都有各自的优缺点, 为了可以结合两者的优点发挥其各自的优势, 混合直流输电系统 (Hybrid-HVDC) 成为研究的热点。2015 年 1 月 ABB 正式交付了 Skagerrak 4 HVDC Light 工程。该工程将在挪威和丹麦之间原有的三级 Skagerrak LCC-HVDC 的基础上建立采用 VSC-HVDC 的第四极, 并与原有第三极组成新的双极系统。该项目是世界首个将 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 结合成双极混合 HVDC 工

程, 也是世界上首个投运的混合直流输电工程。该工程第四极 VSC-HVDC 的电压等级为 500 kV, 传输功率容量为 700 MW; 第三极 LCC-HVDC 的电压等级为 350 kV, 传输功率容量为 500 MW。混合直流输电包含混合双端直流输电系统和混合双极直流输电系统, 现对混合双极直流输电系统开展研究。

文献[10]根据两端特定频率电流波形特征, 提出了一种新的直流输电线路纵联保护方案。文献[11]引入信号距离的概念来计算线路两端电流的互距离, 进而判断线路故障。文献[12]分析了高压直流线路和边界的频率特性, 提出了利用保护元件区分对侧区内外故障的保护原理。文献[13]提出了一种利用线路两段固有频率特征的纵联保护方案。文献[14]提出了一种基于纵联阻抗的输电线路保护方法。文献[15]提出了一种基于 Kaiser 窗滤波的高压直流输电线路保护方法。文献[16]提出了一种基于限流电抗器上电压变化率的柔性直流电网保护方案。文献[17]分析了利用反行波幅值积分的比值的保护方法。文献[18]提出了一种采用行波保护、电压突变量与电流突变量保护相结合的柔性直流输电线路保护原理。文献[11-13, 15, 17]针对的是传统高压直流输电线路的保护, 文献[16, 18]针对的是柔性直流输电线路的保护, 而本文针对的是混合直流输电线路的保护。文献[19]通过引入装置时钟差的概念, 提出一种基于时钟差

2018 年 9 月 30 日收到 国家自然科学基金(51777166)和
国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U1766209)资助
第一作者简介: 高淑萍(1970—), 女, 汉族, 河南新乡人, 博士, 讲师。
E-mail: gao.sp2003@163.com。

的数据同步方法,该方法以乒乓对时为基础、参考向量法对时作辅助,解决了自愈环网双向通道由不一致时数据的同步问题。文献[20]介绍了纵联电流差动保护利用数字通道进行采样时刻同步、采样序号同步及通道延时计算的原理。文献[21]在时域平移一端数据,并对比差动电流的大小,可以进行区外故障数据同步的识别。在分布参数模型下构造时域电流差动保护,可以获得区外故障实时的数据不同步时间信息,并在时域中实时调节差流和整定门槛,保证了差动保护不因区外故障数据不同步而误动。混合双极直流输电系统的结构与传统双极直流输电系统和两电平双极柔性直流输电系统均有所不同,故其系统在发生故障时的故障特性可能与现有的双极直流输电都有所不同,因此有必要对混合双极直流输电系统进行故障分析。传统的高压直流输电是 ABB 或西门子行波保护作为主保护,电流差动保护和微分欠压保护作为后备保护,其拓扑结构的边界条件为直流滤波器和平波电抗器,而柔性直流输电拓扑结构的边界条件为直流大电容没有直流滤波器和平波电抗器。由于拓扑结构的差异,边界条件不同,可能会不适合本混合输电系统负极直流线路的保护,还需进一步进行 ABB 和西门子行波保护的适应性分析。因此,根据高压直流输电发展趋势,有必要开展混合双极直流输电系统直流线路发生故障时的故障特性以及线路保护新原理的研究。

现对混合双极直流输电系统的故障附加状态进行分析,如正极区内外故障、负极故障、双极故障等故障状态。提出利用纵向阻抗的保护新原理,该原理可以区分区内外故障,并可实现故障选极。结合实际直流输电工程,由于两电平柔性直流输电系统换流器的限制原因,在 PSCAD 电磁暂态仿真软件中搭建正极 500 kV、负极 -200 kV 的混合双极直流输电系统,利用 MATLAB 进行算法验证。

1 混合双极直流输电系统的拓扑结构

混合双极直流输电系统的拓扑结构如图 1 所示,其正极直流电压为 +500 kV,直流电流为 1 kA 的传统直流输电系统(LCC-HVDC),负极直流电压为 -200 kV,直流电流为 -1 kA 的两电平电压源型换流器直流输电(VSC-HVDC)。S₁和 S₂分别为送端交流系统和受端交流系统;Z_{s1}和 Z_{s2}分别为送端和受端系统等值阻抗。T_{s1}和 T_{s2}分别为整流侧 LCC 的换流变压器和 VSC 的换流变压器,T_{r1}和 T_{r2}分别为逆变部分 LCC 和 VSC 的换流变压器。

表 1 给出了 Hybrid Bipolar-HVDC 系统中 LCC 系统的一些重要参数。表 2 给出了 Hybrid Bipolar-

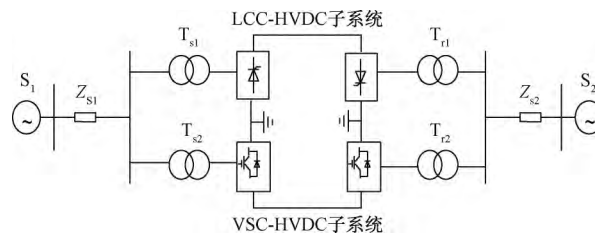


图 1 混合双极直流输电系统结构

Fig. 1 Hybrid bipolar DC transmission system structure

HVDC 系统中 VSC 系统的一些重要参数。送端交流系统: 365 kV, $Z_{s1} = 43.3 \angle 84.2^\circ$; 受端交流系统: 215 kV, $Z_{s2} = 30.3 \angle 75^\circ$ 。

表 1 LCC 系统参数

Table 1 Parameters of the LCC system

LCC(500 kV, 1 kA)	变压器变比	容量/(MV·A)	平波电抗/H
整流侧	345/213	603.73	0.596 8
逆变侧	209/230	603.73	0.596 8

表 2 VSC 系统参数

Table 2 Parameters of the VSC system

VSC(-200 kV, 1 kA)	变压器变比	容量/(MV·A)	直流电容/ μ F
整流侧	345/115	603.73	2 000
逆变侧	115/230	603.73	2 000

2 混合双极直流输电系统的故障特性分析

混合双极直流输电系统故障设置如图 2 所示。图 2 中,正极和负极的直流输电线路都采用架空线,线路长度均为 200 km;Pr 和 Pi 分别为正极整流侧和逆变侧的继电保护装置,Nr 和 Ni 分别为负极整流侧和逆变侧的继电保护装置。 f_1 为正极区内接地故障; f_2 为负极区内接地故障; f_3 为正极整流侧的区外接地故障; f_4 为正极逆变侧区外接地故障; f_5 为正负极双极接地故障; f_6 为正负极双极短路故障。

定义正极纵向阻抗为^[14]

$$Z_1 = \frac{\Delta U_P}{\Delta I_P} \quad (1)$$

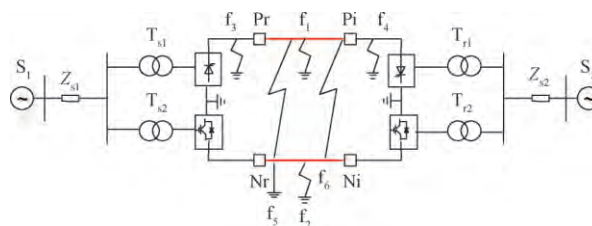


图 2 混合双极直流输电系统故障设置

Fig. 2 Hybrid bipolar DC transmission system fault

式(1)中: $\Delta U_P = \Delta U_{Pr} - \Delta U_{Pi}$; $\Delta I_P = \Delta I_{Pr} + \Delta I_{Pi}$; ΔU_{Pr} 和 ΔU_{Pi} 分别为正极整流侧和逆变侧的电压故障分量; ΔI_{Pr} 和 ΔI_{Pi} 分别为正极整流侧和逆变侧的电流故障分量。

定义负极纵向阻抗为^[14]

$$Z_2 = \frac{\Delta U_N}{\Delta I_N} \quad (2)$$

式(2)中: $\Delta U_N = \Delta U_{Nr} - \Delta U_{Ni}$; $\Delta I_N = \Delta I_{Nr} + \Delta I_{Ni}$; ΔU_{Nr} 和 ΔU_{Ni} 分别为负极整流侧和逆变侧的电压故障分量; ΔI_{Nr} 和 ΔI_{Ni} 分别为负极整流侧和逆变侧的电流故障分量。

2.1 直流线路发生故障时的故障附加状态分析

混合双极直流输电系统发生故障时的故障附加状态如图3所示。 Z_{Pr} 、 Z_{Pi} 、 Z_{Nr} 、 Z_{Ni} 分别代表故障点到 Pr、Pi、Nr、Ni 的线路等效阻抗, Z_{Prx} 、 Z_{Pix} 、 Z_{Nrx} 、 Z_{Nix} 分别代表两边交流侧的等效阻抗。 U_f 为故障点的故障附加电源。整流侧和逆变侧的电流正方向都规定为由母线指向线路是正方向。

故障 f_1 是正极区内故障,由图3(a)可以得出,线路两端的电压故障分量差可以表示为

$$\Delta U_P = \Delta I_{Pr} Z_{Pr} - \Delta I_{Pi} Z_{Pi} \quad (3)$$

线路两端的电压故障分量可分别表示为

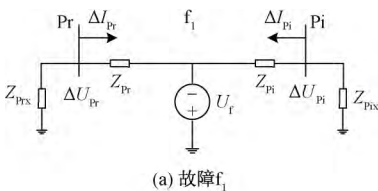
$$\Delta U_{Pr} = -U_f \frac{Z_{Prx}}{Z_{Prx} + Z_{Pr}} \quad (4)$$

$$\Delta U_{Pi} = -U_f \frac{Z_{Pix}}{Z_{Pix} + Z_{Pi}} \quad (5)$$

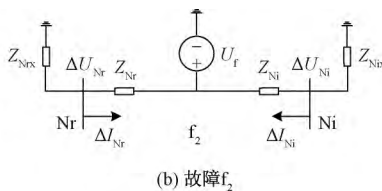
电流故障分量的相量和表示为

$$\Delta I_P = -U_f \frac{Z_{Prx} + Z_{Pr} + Z_{Pi} + Z_{Pix}}{(Z_{Prx} + Z_{Pr})(Z_{Pix} + Z_{Pi})} \quad (6)$$

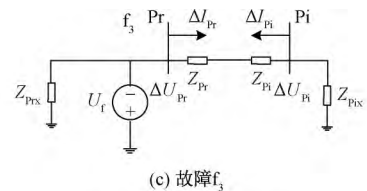
所以正极区内故障时的纵向阻抗的幅值为



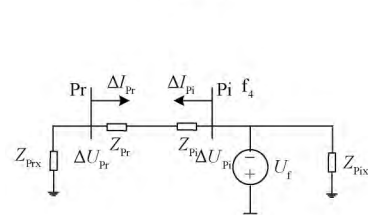
(a) 故障 f_1



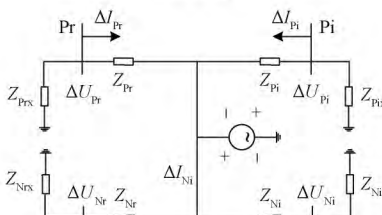
(b) 故障 f_2



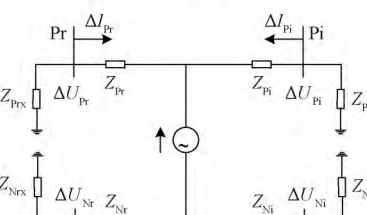
(c) 故障 f_3



(d) 故障 f_4



(e) 故障 f_5



(f) 故障 f_6

图3 LCC-VSC 故障附加状态

Fig.3 LCC-VSC fault attached state

$$|Z_1| = \left| \frac{\Delta U_P}{\Delta I_P} \right| = \left| \frac{Z_{Prx} Z_{Pi} - Z_{Pix} Z_{Pr}}{Z_{Prx} + Z_{Pr} + Z_{Pi} + Z_{Pix}} \right| < |Z_{Pr} + Z_{Pi}| \quad (7)$$

式(7)中: $Z_{Pr} + Z_{Pi}$ 为正极线路全长总阻抗。

故障 f_2 是负极区内故障,由图3(b)可以得出其推理过程与结果与故障 f_1 相似,所以负极区内故障时的纵向阻抗的幅值为

$$|Z_2| = \left| \frac{\Delta U_N}{\Delta I_N} \right| = \left| \frac{Z_{Nrx} Z_{Ni} - Z_{Nix} Z_{Nr}}{Z_{Nrx} + Z_{Nr} + Z_{Ni} + Z_{Nix}} \right| < |Z_{Nr} + Z_{Ni}| \quad (8)$$

式(8)中: $Z_{Nr} + Z_{Ni}$ 为负极线路全长总阻抗。

故障 f_3 是正极区外(整流侧)故障,由图3(c)可以得出,线路两端的电压故障分量差可以表示为

$$\Delta U_P = \Delta I_{Pi} (Z_{Pr} + Z_{Pi}) = -\Delta I_{Pr} (Z_{Pr} + Z_{Pi}) = \frac{1}{2} (\Delta I_{Pi} - \Delta I_{Pr}) (Z_{Pr} + Z_{Pi}) \quad (9)$$

电流故障分量的相量和为

$$\Delta I_P = 0 \quad (10)$$

所以正极区外(整流侧)故障时的纵向阻抗的幅值为

$$|Z_1| = \left| \frac{\Delta U_P}{\Delta I_P} \right| = \infty > |Z_{Pr} + Z_{Pi}| \quad (11)$$

式(11)中: $Z_{Pr} + Z_{Pi}$ 为正极线路全长总阻抗。

故障 f_4 是正极区外(逆变侧)故障,由图3(d)可以得出:故障 f_4 与故障 f_3 分析过程类似,同理可得,故障 f_4 的纵向阻抗的幅值也如式(11)。

故障 f_5 是正负双极区内接地故障,由图3(e)可以得出:正极的纵向阻抗的幅值如同故障 f_1 的纵向阻抗的幅值,如式(7);负极的纵向阻抗的幅值如同故障 f_2 的纵向阻抗的幅值,如式(8)。

故障 f_6 是正负双极区内短接故障,由图 3(f) 可以得出: 正极的纵向阻抗的幅值如同故障 f_1 的纵向阻抗的幅值,如式(7); 负极的纵向阻抗的幅值如同故障 f_2 的纵向阻抗的幅值,如式(8)。

2.2 故障选极

由于故障极与非故障极的纵向阻抗不同,所以该保护方法可以自行进行故障选极。故障极的纵向阻抗的幅值小于该极线路全长总阻抗,非故障极的纵向阻抗的幅值大于该极线路全长总阻抗。正极输电线路和负极输电线路的全长为 200 km,单位长度的阻抗为 $3.2062 \times 10^{-4} + j0.2 \times 10^{-7}$,总阻抗均为 $6.4124 + j0.004$,所以 $|Z_{Pr} + Z_{Pi}| = 6.4$, $|Z_{Nr} + Z_{Ni}| = 6.4$ 。考虑到过渡电阻等因素的影响,为保证保护动作更具有灵敏性与可靠性,设置整定值 $Z_{set} = 10$ 。因此当 $|Z_1| < Z_{set}$ 时,判定为正极发生故障; 当 $|Z_2| < Z_{set}$ 时,判定为负极发生故障; 当 $|Z_1| < Z_{set}$ 且 $|Z_2| < Z_{set}$ 时,判定为双极发生故障。

3 保护整定及保护方法

由于在发生区内故障时,纵向阻抗的幅值小于该极线路全长总阻抗,在发生区外故障时,纵向阻抗的幅值大于该极线路全长总阻抗。由上文可知: 正、负极输电线路的全长总阻抗均为 6.4,区分区内、外故障的正极和负极纵向阻抗整定值均为 $Z_{set} = 10$ 。即当纵向阻抗小于整定值时,为区内故障; 当纵向阻抗大于整定值时,为区外故障。

混合双极直流输电直流线路的保护分为以下几个步骤:

(1) 先提取并检测混合双极直流输电系统两端的直流电压 U_{dc} ,当时 $dU_{dc}/dt > SET$,认为直流输电线路发生故障 (SET 为直流电压 U_{dc} 关于时间 t 的变化率的整定值)。

(2) 继电保护装置同时提取两端的电压和电流分量,用来减去故障前一个周波的实际值得到故障时的电压故障分量和电流故障分量,进而进行计算生成纵向阻抗。

(3) 根据纵向阻抗的幅值来判断区内、外故障。若纵向阻抗的幅值大于整定值 Z_{set} ,则为区外故障; 若纵向阻抗的幅值小于整定值 Z_{set} ,则为区内故障。

(4) 通过正极和负极的纵向阻抗幅值来判断故障极,若 $|Z_2| < Z_{set}$ 时,负极发生故障; 若 $|Z_1| < Z_{set}$ 时,正极发生故障; 若 $|Z_1| < Z_{set}$ 且 $|Z_2| < Z_{set}$ 时,发生双极故障。

混合双极直流输电直流线路保护的流程图如图 4 所示。

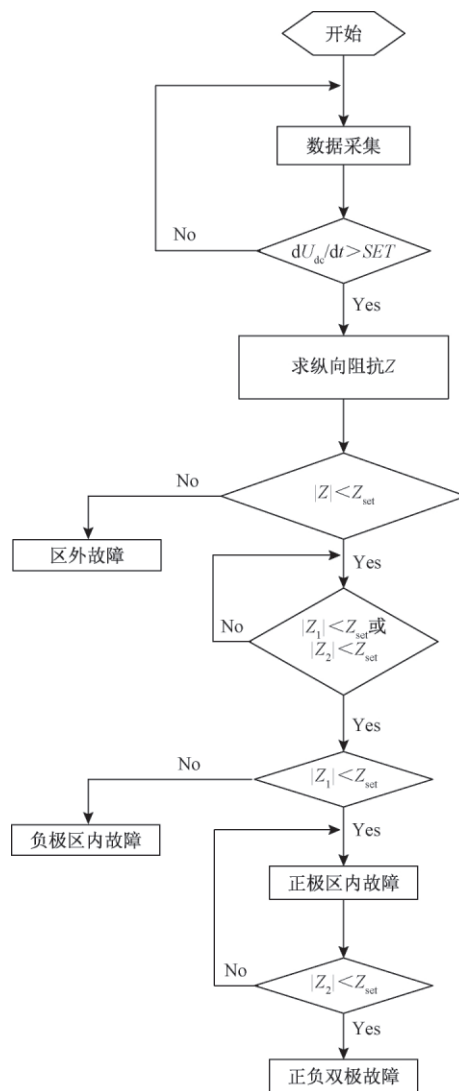


图 4 保护实现的流程图

Fig. 4 Line protection flow chart

4 仿真验证

4.1 区内故障仿真结果

故障 f_1 的仿真结果如图 5 所示。

综上可得, $|Z_1| < 10$, 判定为区内故障, 又 $|Z_2| > 10$, 所以为正极区内故障。

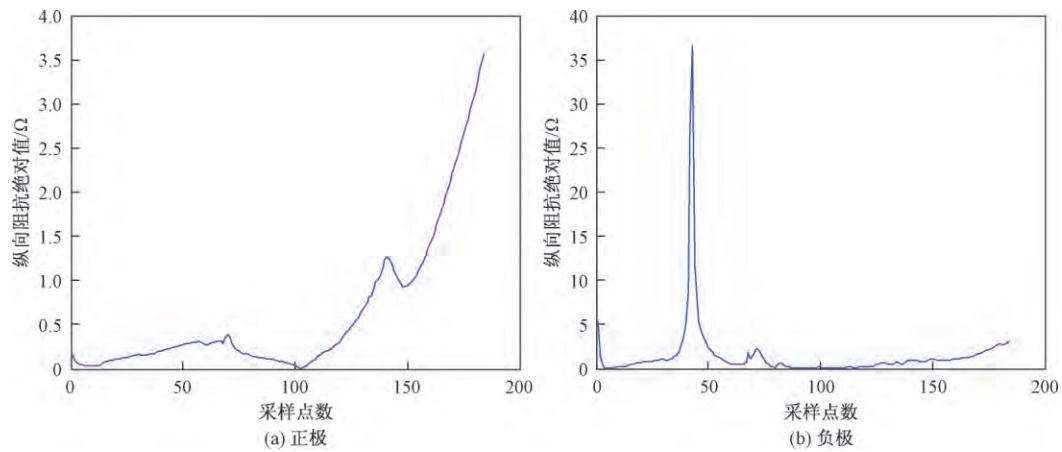
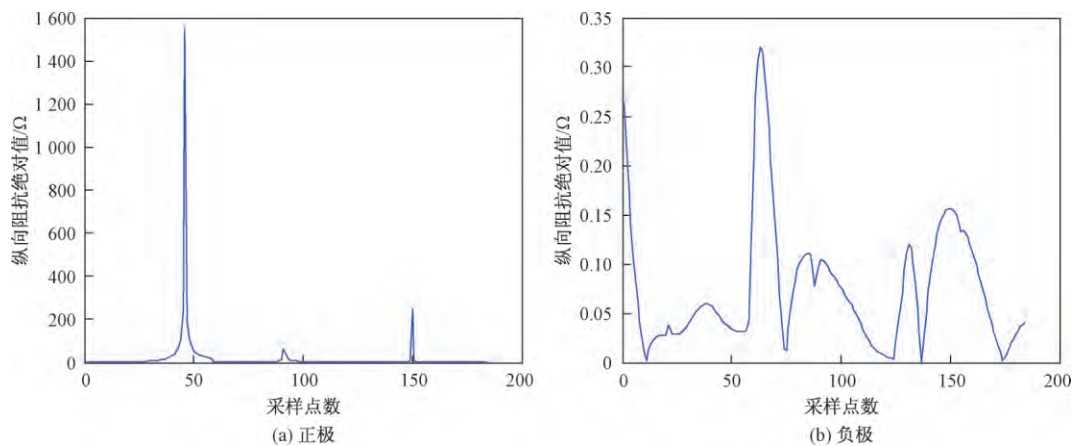
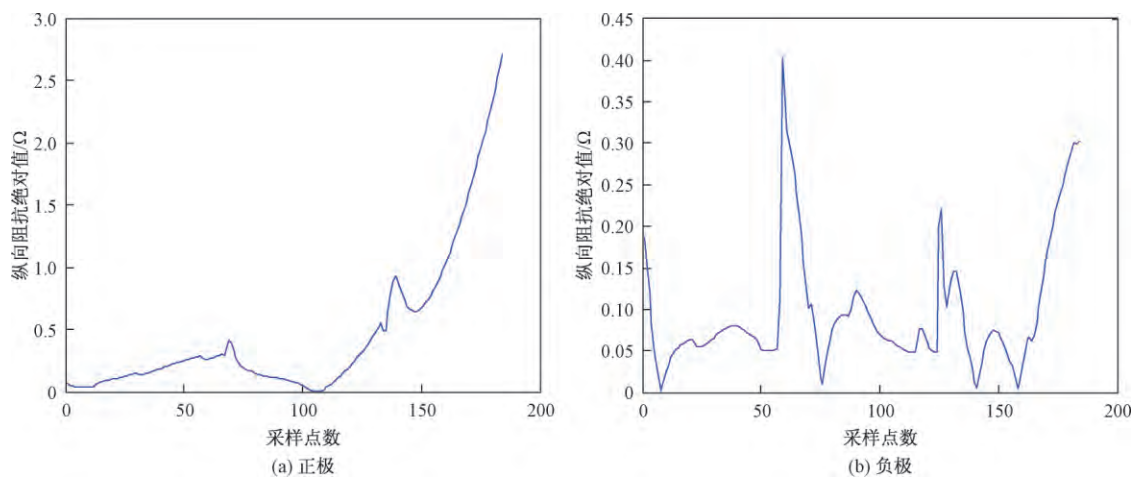
故障 f_2 的仿真结果如图 6 所示。

综上可得, $|Z_2| < 10$, 判定为区内故障, 又 $|Z_1| > 10$, 所以为负极区内故障。

故障 f_3 的仿真结果如图 7 所示。

综上可得, $|Z_1| < 10$, 判定为区内故障; $|Z_2| < 10$, 判定为区内故障。因此为正负双极故障。

故障 f_6 的仿真结果如图 8 所示。

图5 故障 f_1 仿真结果Fig. 5 Fault f_1 simulation result图6 故障 f_2 仿真结果Fig. 6 Fault f_2 simulation result图7 故障 f_3 仿真结果Fig. 7 Fault f_3 simulation result

综上可得, $|Z_1| < 10$, 判定为区内故障;
 $|Z_2| < 10$, 判定为区内故障。因此为正负双极故障。

4.2 区外故障仿真结果

故障 f_3 的仿真结果如图9所示。

综上可得, $|Z_1| > 10$, 判定为区外故障。

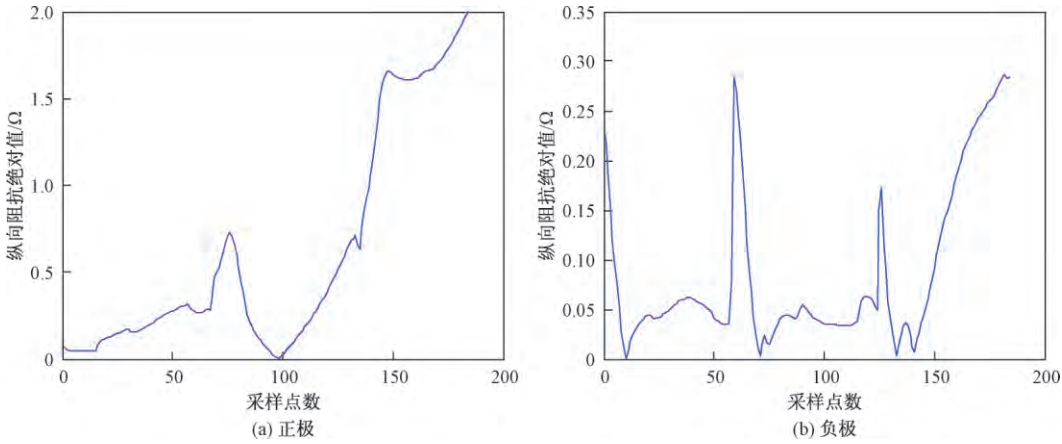


图 8 故障 f_6 仿真结果

Fig. 8 Fault f_6 simulation result

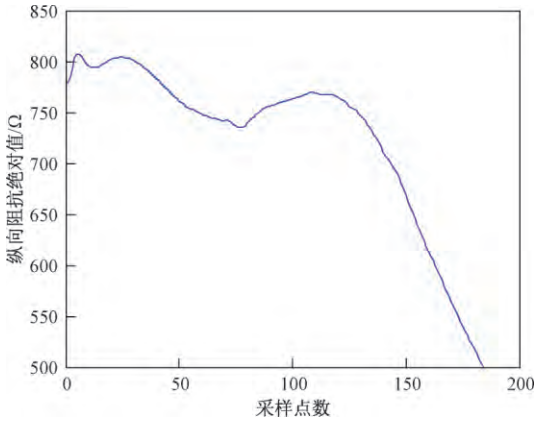


图 9 故障 f_3 正极仿真结果

Fig. 9 Fault f_3 simulation result

故障 f_4 的仿真结果如图 10 所示。
综上可得, $|Z_1| > 10$, 判定为区外故障。

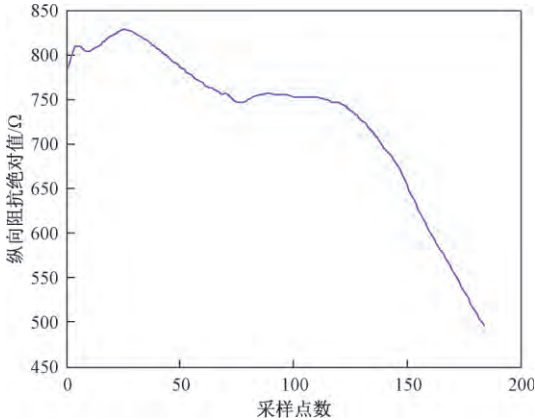


图 10 故障 f_4 正极仿真结果

Fig. 10 Fault f_4 simulation result

4.3 不同过渡电阻时仿真结果

考虑到过渡电阻会使保护的可靠性变低, 现在故障电阻为 100、200、500 Ω 的情况下进行仿真, 进

而验证保护方法的可靠性。故障 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6 分别在不同过渡电阻下的仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同过渡电阻的仿真结果

Table 3 Different transition resistance simulation results

故障位置	故障接地电阻/ Ω	$ Z_1 $	$ Z_2 $	判定故障
故障 f_1	100	< 10	> 10	正极区内
	200	< 10	> 10	正极区内
	500	< 10	> 10	正极区内
故障 f_2	100	> 10	< 10	负极区内
	200	> 10	< 10	负极区内
	500	> 10	< 10	负极区内
故障 f_3	100	> 10	> 10	正极区外
	200	> 10	> 10	正极区外
	500	> 10	> 10	正极区外
故障 f_4	100	> 10	> 10	正极区外
	200	> 10	> 10	正极区外
	500	> 10	> 10	正极区外
故障 f_5	100	< 10	< 10	正负双极
	200	< 10	< 10	正负双极
	500	< 10	< 10	正负双极
故障 f_6	100	< 10	< 10	正负双极
	200	< 10	< 10	正负双极
	500	< 10	< 10	正负双极

由表 3 仿真结果可得, 6 种类型的故障在过渡电阻分别为 100、200、500 Ω 时都可以被准确地区分区内、外故障以及故障选极。

5 结论

混合直流输电已经成为现在研究的热点, 首先, 本文针对混合双极直流输电在 PSACAD 软件建立了模型, 分析了混合双极直流输电系统的故障特性, 定义了正负极的纵向阻抗, 由此得出根据纵向阻抗幅值区分区内外直流线路保护原理。当纵向阻抗幅值小于整定值时, 则为区内故障; 当纵向阻抗幅值大于整定值时, 则为区外故障。通过正极和负极的

纵向阻抗幅值可以自实现判断故障极。最后,分析了在不同过渡电阻时保护原理对故障的判定情况。

利用 MATLAB 进行算法的仿真验证,结果表明,该保护原理可以快速识别混合双极直流输电系统区内故障,并可以自行实现故障选极;可靠性高,耐过渡电阻能力强。

参 考 文 献

- 刘文静. 电压源、电流源混合型直流输电的运行机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014
Liu Wenjing. Research on the operating mechanism for voltage-current source hybrid-HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014
- 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
Zhao Wanjuan. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004
- 杨 秀, 陈鸿煜, 靳 希. 高压直流输电系统动态恢复特性的仿真研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 11-14
Yang Xiu, Chen Hongyu, Jin Xi. Simulation research on dynamic recovery characteristics of HVDC system[J]. High Voltage Technology, 2006, 32(9): 11-14
- 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010
Tang Guangfu. High voltage direct current transmission technology based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010
- 吴 娜. 高压直流输电系统分析与控制初探[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005
Wu Na. Analysis and control of HVDC transmission system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005
- 袁 阳, 卫志农, 雷 霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147
Yuan Yang, Wei Zhinong, Lei Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147
- Zhang Y, Menzies R W, Nayak O B, et al. Dynamic performance of a STATCOM at an HVDC inverter feeding a very weak AC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(11): 958-964
- Nayak O B, Gole A M, Chapman D G, et al. Dynamic performance of static and synchronous compensators at an HVDC inverter bus in a very weak AC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1350-1358
- Chan-Ki K. Dynamic coordination strategies between HVDC and STATCOM[C]// Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Seoul, South Korea: IEEE, 2009: 1-9
- 刘 剑, 邵能灵, 范春菊. 基于电流波形匹配的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1736-1743
Liu Jian, Tai Nengling, Fan Chunju. Pilot protection of HVDC transmission lines based on current waveform matching[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1736-1743
- 于 洋, 孙学锋, 高 鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154
Yu Yang, Sun Xuefeng, Gao Peng, et al. Transient protection analysis and prospect of HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154
- 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. The principle of double-end voltage transient protection for UHVDC transmission lines using protection elements to distinguish the faults in the opposite side zone[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 14-20
- 武 晓, 何正友, 彭少博, 等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 67-73
Wu Xiao, He Zhengyou, Peng Shaobo, et al. Pole-line protection method for UHVDC transmission lines based on inherent frequencies of traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 67-73
- 夏经德, 索南加乐, 王 莉, 等. 基于纵联阻抗幅值的输电线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 43-51
Xia Jingde, Suonan Jiale, Wang Li, et al. Transmission line pilot protection based on longitudinal impedance amplitude[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 43-51
- 夏经德, 索南加乐, 张泽宁, 等. 基于解耦后输电线路纵向阻抗的改进型纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 58-65
Xia Jingde, Suonan Jiale, Zhang Yining, et al. Improved pilot protection based on decoupled longitudinal impedance of transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 58-65
- 夏经德, 索南加乐, 王志恩, 等. 基于纵联阻抗相角的输电线路纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 20-27
Xia Jingde, Suonan Jiale, Wang Zhien, et al. Longitudinal protection of transmission lines based on longitudinal impedance phase angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 20-27
- 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 for HVDC transmission lines based on inversion wave amplitude comparison[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3095-3101
- 姚为正, 行登江, 吴金龙, 等. 柔性直流电网超高速保护方案研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1710-1718
Yao Weizheng, Hang Dengjiang, Wu Jinlong, et al. Research on ultra-high speed protection scheme of flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1710-1718
- 沈 冰, 何奔腾, 张雪松. 基于时钟差的线路电流差动保护数据同步方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 78-83
Shen Bing, He Benteng, Zhang Xuesong. Data synchronization method of line current differential protection based on clock difference[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 78-83
- 李 钢, 冯辰虎, 孙集伟, 等. 纵联电流差动保护数据同步技术及通道切换时数据交换的研究[J]. 电力系统保护与控制,

2010 ,38(22) : 141-145 ,150

Li Gang ,Feng Chenhu ,Sun Jiwei ,et al. Study on data synchronization technology of longitudinal current differential protection and data exchange during channel switching [J]. Power System Protection and Control ,2010 ,38(22) : 141-145 ,150

21 刘 琪 ,宋国兵. 利用时域波形比对的高压直流输电线路电流差动保护 [J]. 电力系统自动化 ,2015 ,39(24) : 87-95

Liu Qi , Song Guobing. Current differential protection of HVDC transmission lines using time domain waveform comparison [J]. Automation of Electric Power Systems ,2015 ,39(24) : 87-95

New Principle of Hybrid Bipolar DC Transmission Line Protection Based on Longitudinal Impedance

GAO Shu-ping¹ ,ZHU Hang-jian¹ ,YE Huan-fei¹ ,ZHANG Bao-hui² ,SONG Guo-bing²

(Xi'an University of Science and Technology¹ ,Xi'an 710054 ,China; School of Electrical Engineering ,Xi'an Jiaotong University² ,Xi'an 710049 ,China)

[Abstract] Because of their own advantages and disadvantages of traditional high-voltage direct current(HVDC) transmission and flexible HVDC transmission ,in order to give full play to their advantages ,hybrid HVDC transmission has been become a research hotspot. The protection principle of hybrid bipolar DC transmission lines consisting of traditional HVDC transmission and flexible HVDC transmission was studied. Simulation modeling was put up with PSCAD ,protection algorithm was carried out with MATLAB. It indicates that the concept of impedance is extended ,and a fault protection principle based on the longitudinal impedance of the rectifier side and the inverter side is proposed. The longitudinal impedance is the ratio of the difference between the transient voltage across the rectifier side and the inverter side and the sum of the transient currents. The amplitude of longitudinal impedance is used to distinguish the internal and external faults. The amplitude of the longitudinal impedance is less than the setting value when the fault is internal fault; the amplitude of the longitudinal impedance is greater than the setting value when the fault is external fault. The fault selection pole can be self-actualized ,the amplitude of longitudinal impedance of the fault pole is less than the setting value ,and the amplitude of longitudinal impedance of the non-fault pole is greater than the setting value. The proposed protection principle is correct ,and fault pole selection can be achieved.

[Key words] hybrid bipolar hvdc system relay protection longitudinal impedance transient component