

基于时域卷积功率差的多端混合高压直流 线路快速纵联保护方法

李海锋¹, 褚倍钰¹, 梁远升¹, 邓成江², 王 钢¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 2. 南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510663)

摘要:针对现有直流线路差动保护速动性不足、双端数据需要严格同步的问题,以三端混合高压直流输电系统为对象,在S域上对不同故障情况下的功率特性进行数学解析,发现利用S域功率差特征可以有效识别区内外故障,并实现故障区域的准确定位;在此基础上,构造了一种时域故障特征量——卷积功率,实现对S域功率特征的有效提取;进而提出了一种基于时域卷积功率差的多端混合高压直流线路快速纵联保护方法。基于PSCAD/EMTDC的仿真验证表明,该方案能在4 ms/10 kHz的时间窗内正确识别区内故障和故障区域,并具有故障选极的特性,无需双端数据严格同步,且具有较高的可靠性、灵敏性及抗干扰能力。

关键词:多端混合高压直流;线路保护;卷积功率;纵联保护;继电保护

中图分类号: TM77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202210005

0 引言

高压直流输电系统由于具有传输容量大、输电距离远、线路损耗低等优点,已经被广泛应用于远距离大容量输电,但换相失败是其面临的主要问题^[1-2]。相比之下,基于电压源型换流器的柔性直流输电系统不存在换相失败的问题,但它造价高、运行损耗大^[3]。近年来,新兴的多端混合高压直流输电系统采用电网换相换流器(line commutated converter, LCC)作为功率集中输送端、多个模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)作为多落点受端,综合了常规直流和柔性直流的优点,是直流输电技术发展的重要方向之一^[4]。

由于直流输电系统跨度大,架空线路运行环境恶劣,故障发生概率高,直流线路保护作为直流输电中的关键技术一直受到了广泛的关注。直流线路保护通常分为单端量保护和纵联保护2类。单端量保护由于具有较好的速动性,通常用作线路保护中的主保护;然而单端量保护往往存在过度依赖边界元件、过渡电阻耐受能力不足等缺点^[5-6]。相比之下,纵联保护由于利用了双端电气量,具有更高的灵敏性,常在实际直流工程中用作后备保护。

传统的直流线路电流差动保护能够有效识别高阻故障,但是在区外故障下,长距离输电线路中的差动电流容易受到分布电容电流的影响而超过整定

值,造成保护误动。因此,电流差动保护往往需要通过保护延时来避开分布电容放电的暂态过程,从而降低了保护的速动性。不少学者就此提出了电流差动保护的改进方法,在一定程度上消除了分布电容电流对差动电流的影响^[7-9]。但是这些方法往往计算量大,过度依赖线路模型和参数的准确性,并且双端数据需要严格同步。也有学者基于故障行波提出了新的纵联保护方法,提高了保护的速度^[10-11]。但是行波易受线路衰减、色散以及折反射的影响,存在可靠性不足的问题。此外,还有学者提出了利用故障暂态时、频特征的纵联保护方法,通过分析和提取故障暂态时、频特征进而完成区内外故障识别和故障选极等^[12-15]。

但是上述保护方法均是基于传统双端高压直流输电系统,若将上述方法直接应用于多端混合高压直流输电系统,则2种输电系统运行方式、拓扑结构、保护要求的不同,将会导致一些新的问题。多端混合高压直流输电系统的故障暂态过程需要同时考虑LCC、MMC这2类换流器不同的故障响应特性对故障暂态过程及故障特征的影响。其次,多端混合高压直流输电系统的拓扑结构更加复杂,如存在T区汇流母线,导致直流线路两端的边界结构及其等值特性复杂多样。同时,多端混合高压直流线路发生故障后,还要求保护能够快速准确地定位故障区域,实现故障线路区段的有效隔离,以保证系统剩余部分继续正常运行。

针对多端混合高压直流线路的保护,也有部分学者开展了研究,提出了新的纵联保护方法。文献[16]利用行波在不同线路边界处的折反射差异提出了基于故障电压首极值时间的直流线路快速保护方案,但是没有考虑到T区汇流母线这一特殊结构。

收稿日期:2022-05-18;修回日期:2022-09-06

在线出版日期:2022-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077082);广东省基础与应用基础研究项目(2022A1515010906)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077082) and Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2022A1515010906)

文献[17]分析了并联接入换流器对故障暂态行波的影响,提出了基于T区两侧暂态电流能量差的故障方向判别原理。但已有的针对多端混合高压直流线路的纵联保护方法,大多是基于暂态行波类的保护方法,这类方法主要依靠行波波头信息识别故障,对采样频率、数据同步性的要求较高,当噪声干扰较为严重时保护效果也不尽人意。

为了解决上述问题,本文以三端混合高压直流输电系统为对象,对区外故障及区内不同区域故障下的S域功率特性进行数学解析,分析了保护区各端S域功率差的特征;在此基础上提出一种基于时域卷积功率差的多端混合高压直流线路快速纵联保护方法;最后,基于实际工程的PSCAD/EMTDC仿真模型对所提方法的性能进行了详细的验证与分析。

1 多端混合高压直流线路故障特性分析

1.1 系统结构

三端混合高压直流输电系统的示意图如附录A图A1所示,该系统由1个LCC、2个MMC组成,T区汇流母线将直流线路 L_1 、换流器、直流线路 L_2 相连。在LCC出口直流母线处配备平波电抗器和直流滤波器,在MMC出口直流母线处配备限流电抗器。图中给出了系统的典型故障点,其中: f_1 为直流线路 L_1 上的区内故障点; f_2 为T区汇流母线上的区内故障点; f_3 为直流线路 L_2 上的区内故障点; F_{out1} 为LCC侧的区外故障点; F_{out2} 为MMC₁侧的区外故障点; F_{out3} 为MMC₂侧的区外故障点。在直流线路 L_1 两侧安装保护测点A、B₁,在MMC₁出口处安装保护测点B₁,在直流线路 L_2 两侧安装保护测点B₂、C。设2条直流线路的电流正方向分别为LCC侧流向MMC₁侧和MMC₁侧流向MMC₂侧。

1.2 区内故障下的S域功率差特征

与交流系统不同,直流输电系统发生故障时,其控制系统将响应。考虑故障初始阶段,直流控制的作用仍不明显,因此可以应用叠加定理,将故障电路近似等效为正常状态的电路和故障附加电路的叠加。

1.2.1 直流线路故障

以直流线路 L_1 上 f_1 处发生故障为例,利用叠加原理获得故障附加电路图,再对故障附加电路图进行拉式变换,得到S域下的故障附加电路图如图1所示。图中: U_0 为正常运行下的线路电压; $U_f(s)$ 为故障点处的线路电压; R_f 为故障过渡电阻; Z_{AB} 为线路 L_1 等效阻抗; Z_{BC} 为线路 L_2 等效阻抗; L_{dc} 为平波电抗器等效电感; Z_{filter} 为直流滤波器等效阻抗; Z_{LCC} 为LCC等效阻抗; Z_{MMC1} 、 Z_{MMC2} 分别为MMC₁、MMC₂等效阻抗。

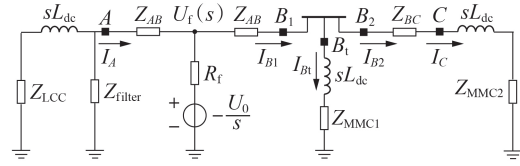


图1 区内故障S域附加电路图

Fig.1 Superimposed circuit diagram of internal fault in S-domain

为了在下文的分析中简化故障特征量的表达式,令:

$$Z_A = Z_{filter} // (sL_{dc} + Z_{LCC}) \quad (1)$$

$$Z_B = sL_{dc} + Z_{MMC1} \quad (2)$$

$$Z_C = sL_{dc} + Z_{MMC2} \quad (3)$$

利用图1可分别得到线路各测点的功率,以线路 L_1 两侧测点A、B₁为例,其功率 $P_A(s)$ 、 $P_{B1}(s)$ 分别为:

$$P_A(s) = -\frac{Z_A}{(Z_A + Z_{AB})^2} U_f^2(s) \quad (4)$$

$$P_{B1}(s) = \frac{Z_B // (Z_{BC} + Z_C)}{[Z_{AB} + Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2} U_f^2(s) \quad (5)$$

用线路 L_1 受端功率减去送端功率可以得到线路 L_1 两侧的功率之差 $\Delta P_1(s)$ 为:

$$\Delta P_1(s) = \left\{ \frac{Z_B // (Z_{BC} + Z_C)}{[Z_{AB} + Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2} + \frac{Z_A}{(Z_A + Z_{AB})^2} \right\} U_f^2(s) \quad (6)$$

类似地可以得到线路 L_2 两侧的功率之差 $\Delta P_2(s)$ 为:

$$\Delta P_2(s) = -\frac{Z_{BC} Z_B^2 U_f^2(s)}{[Z_{AB} (Z_B + Z_{BC} + Z_C) + Z_B (Z_{BC} + Z_C)]^2} \quad (7)$$

直流线路三端功率之差 $\Delta P_{3T}(s)$ 为:

$$\Delta P_{3T}(s) = P_C(s) + P_{B1}(s) - P_A(s) = \left\{ \frac{Z_C [Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2}{(Z_{BC} + Z_C)^2 [Z_{AB} + Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2} + \frac{Z_A}{(Z_A + Z_{AB})^2} + \frac{[Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2}{Z_B [Z_{AB} + Z_B // (Z_{BC} + Z_C)]^2} \right\} U_f^2(s) \quad (8)$$

而当线路 L_2 的 f_3 处发生故障时,情况与线路 L_1 的 f_1 处发生故障完全对称,故不再赘述。

1.2.2 T区汇流母线故障

当T区汇流母线上 f_2 处发生故障时,仍可采用图1进行分析。此时,线路 L_1 两侧的功率之差为:

$$\Delta P_1(s) = -\frac{Z_{AB}}{(Z_A + Z_{AB})^2} U_f^2(s) \quad (9)$$

线路 L_2 两侧的功率之差为:

$$\Delta P_2(s) = -\frac{Z_{BC}}{(Z_{BC} + Z_C)^2} U_f^2(s) \quad (10)$$

直流线路三端的功率之差为:

$$\Delta P_{3T}(s) = P_C(s) + P_{B1}(s) - P_A(s) = \left[\frac{Z_C}{(Z_{BC} + Z_C)^2} + \frac{1}{Z_B} + \frac{Z_A}{(Z_{AB} + Z_A)^2} \right] U_f^2(s) \quad (11)$$

1.3 区外故障下的S域功率差特征

以MMC₂逆变侧 F_{out3} 处发生区外故障为例分析系统区外故障特征。区外故障下的故障附加电路图如图2所示。

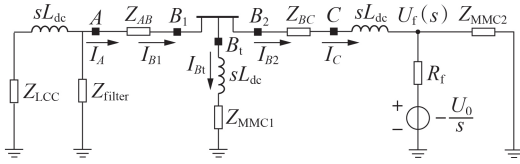


图2 逆变侧区外故障S域附加电路图

Fig.2 Superimposed circuit diagram of external fault at inverter side in S-domain

同理可得线路 L_1 两侧的功率之差为:

$$\Delta P_1(s) = - \frac{Z_{AB} Z_B^2 U_f^2(s)}{(Z_A + Z_B + Z_{AB})^2 [sL_{dc} + Z_{BC} + Z_B // (Z_{AB} + Z_A)]^2} \quad (12)$$

线路 L_2 两侧的功率之差为:

$$\Delta P_2(s) = - \frac{Z_{BC} U_f^2(s)}{[sL_{dc} + Z_{BC} + Z_B // (Z_{AB} + Z_A)]^2} \quad (13)$$

直流线路三端的功率之差为:

$$\Delta P_{3T}(s) = P_C(s) + P_{B1}(s) - P_A(s) = \left\{ \frac{Z_{AB} Z_B^2}{(Z_A + Z_B + Z_{AB})^2 [sL_{dc} + Z_{BC} + Z_B // (Z_{AB} + Z_A)]^2} + \frac{Z_{BC}}{[sL_{dc} + Z_{BC} + Z_B // (Z_{AB} + Z_A)]^2} \right\} U_f^2(s) \quad (14)$$

1.4 S域功率差特征的量化分析

为了进一步比较区内外故障的特征差异,对直流线路故障、T区母线故障、区外故障下的S域功率差进行量化分析。以线路 L_1 区内故障下的 $\Delta P_1(s)$ 为例,把 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 、 $U_f(s)$ 均展开代入式(6)中有:

$$\Delta P_1(s) = \left\{ \frac{(sL_{dc} + Z_{MMC1}) // (Z_{BC} + sL_{dc} + Z_{MMC2})}{[Z_{AB} + (sL_{dc} + Z_{MMC1}) // (Z_{BC} + sL_{dc} + Z_{MMC2})]^2} + \frac{Z_{filter} // (sL_{dc} + Z_{LCC})}{[Z_{AB} + Z_{filter} // (sL_{dc} + Z_{LCC})]^2} \right\} \left(\frac{H}{J} \frac{U_0}{s} \right)^2 \quad (15)$$

$$H = [Z_{AB} + Z_{filter} // (sL_{dc} + Z_{LCC})] // [Z_{AB} + (sL_{dc} + Z_{MMC1}) // (Z_{BC} + sL_{dc} + Z_{MMC2})]$$

$$J = [Z_{AB} + Z_{filter} // (sL_{dc} + Z_{LCC})] // [Z_{AB} + (sL_{dc} + Z_{MMC1}) // (Z_{BC} + sL_{dc} + Z_{MMC2})] + R_f$$

由式(15)可以看出 $\Delta P_1(s)$ 的每项单项式分母的 s 次数均高于分子的 s 次数,因此 s 越小, $|\Delta P_1(s)|$

就越大;反之,当 s 很大时, $|\Delta P_1(s)|$ 的数值很小。即相对于低频量,高频功率差从具体的数值上要小很多,不利于故障特征的提取。类似地,其他故障情况下的功率差在展开后均有分母的 s 次数高于分子的 s 次数这样的特点,结论也是相同的。

参照昆柳龙工程参数,将 $s = \sigma + j\omega$ 代入式(8)、(11)、(14),可以得到直流线路故障、T区母线故障、区外故障下 $\Delta P_{3T}(s)$ 的幅值三维曲线图。考虑到式(14)带了负号,因此在进行量化分析时也应该保留负号。则可以得到直流线路故障、T区母线故障、区外故障下保留了正负号的幅值三维曲线图如附录A图A2所示。由图可以看出:在S域的低频频段,区内故障与区外故障有着良好的区分度,即当系统发生区内故障时,有 $\Delta P_{3T}(s) > 0$;当系统发生区外故障时,有 $\Delta P_{3T}(s) < 0$;而在高频频段,区内故障与区外故障较难分辨。经过具体的量化计算可知,在5 Hz以下的频段,有 $|\Delta P_{3T}(s)| > 1$;在5 Hz以上的频段,有 $|\Delta P_{3T}(s)| < 1$ 。因此,可以提取5 Hz以下低频频段的故障特征,以凸显区内外故障下功率差的极性特征差异。

类似地,可得到线路 L_1 故障、线路 L_2 故障和T区母线故障下保留了正负号的 $\Delta P_1(s)$ 、 $\Delta P_2(s)$ 幅值三维曲线图,如附录A图A3、A4所示。由图可看出:在S域的低频频段,不同区域的区内故障有着良好的区分度,而在高频频段内较难分辨。当直流线路 L_1 发生故障时,有 $\Delta P_1(s) > 0$ 、 $\Delta P_2(s) < 0$;当直流线路 L_2 发生故障时,有 $\Delta P_1(s) < 0$ 、 $\Delta P_2(s) > 0$;当T区汇流母线发生故障时,有 $\Delta P_1(s) < 0$ 、 $\Delta P_2(s) < 0$ 。对 $|\Delta P_1(s)|$ 、 $|\Delta P_2(s)|$ 进行具体的量化分析后,同样选择提取5 Hz以下低频频段的故障特征。

综上所述,S域功率差的故障特征如表1所示。

表1 S域功率差的故障特征

Table 1 Fault characteristics of power difference in S-domain

故障位置	$\Delta P_{3T}(s)$	$\Delta P_1(s)$	$\Delta P_2(s)$
线路 L_1	> 0	> 0	< 0
线路 L_2	> 0	< 0	> 0
T区母线	> 0	< 0	< 0
区外	< 0	< 0	< 0

当线路正常运行或者发生区外故障时,根据能量守恒原理,流入线路的能量等于流出能量与损耗能量的总和,因此流出能量减去流入能量是一个负数,即功率差为一个负数。而当直流线路发生区内故障时,守恒关系被打破,流出直流线路的能量减去流入能量为线路自身的损耗加上故障点支路的损耗,是一个正数。可以根据表1所示的故障特征,利用 $\Delta P_{3T}(s)$ 识别区内、外故障,再利用 $\Delta P_1(s)$ 和 $\Delta P_2(s)$

定位故障区域。在此基础上,利用低频信号凸显区内外故障下S域功率差的极性差异,为保护整定带来更充足的裕度。

2 故障暂态特征量提取

2.1 S域功率特征提取

为了提取S域功率特征,在时域中引入卷积功率这一概念。S域下电压、电流的乘积,即为时域下电压、电流的卷积,通过卷积得到的功率称为卷积功率。卷积功率 $p(t)$ 的计算公式为:

$$p(t) = u(t) * i(t) = \int_{t_0}^{t_0+T_s} u(\tau) i(t-\tau) d\tau \quad (16)$$

$$L[u(t) * i(t)] = U(s)I(s) \quad (17)$$

式中: $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别为时域下的电压、电流; $U(s)$ 、 $I(s)$ 分别为S域下的电压、电流; $L[\cdot]$ 表示拉普拉斯变换; t_0 和 T_s 分别为时间窗的起始时刻和长度。

但实际工程中的信号采样不是连续信号而是离散信号,所以将式(16)进行离散化,有:

$$p(x) = \sum_{m=1}^N u(m) i(x-m) \quad 2 \leq x \leq 2N \quad (18)$$

式中: N 为数据窗内的采样点个数。

卷积功率是S域功率的时域形式,相较于瞬时功率,其可以更准确地反映功率的频域信息。本文利用卷积功率有效提取理论分析中的频域功率特征。

2.2 低频功率差特征提取

均值滤波作为一种线性低通滤波,可以滤除信号中的高频信号,保留信号中的低频信号^[18]。均值滤波器对应的时域差分方程为:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k) = \frac{1}{N} (x(n) + x(n-1) + \cdots + x(n-N+1)) \quad (19)$$

其频率响应为:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} e^{-j\omega(N-1)/2} \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (20)$$

由式(20)可以看出均值滤波器的频率响应是一个sinc函数,在 $\omega = 2k\pi/N$ ($k=0, 1, \dots, N-1$)处,其幅值为0,显然,这是一个低通滤波器。

将卷积功率序列元素进行累加,记为能量 E ,则有:

$$E = \sum_{x=2}^{2N} p(x) = \sum_{x=2}^{2N} \sum_{m=1}^N u(m) i(x-m) \quad (21)$$

式(21)也可以写作:

$$E = \sum_{m=1}^N u(1)i(m) + \sum_{m=1}^N u(2)i(m) + \cdots + \sum_{m=1}^N u(N)i(m) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^N u(j)i(m) \quad (22)$$

卷积功率能量 E 相当于电压的每个点和电流的

每个点相乘后的累加和,长度为 N^2 。

再定义一卷积功率指标——卷积功率平均值 p_{ave} 如式(23)所示。

$$p_{ave} = \frac{E}{N^2} \quad (23)$$

卷积功率平均值将 u 的每个点和 i 的每个点相乘后累加再除以能量的长度 N^2 。选用4 ms / 10 kHz的时间窗,采样点数 $N=40$,能量的长度 $N^2=1600$,在计算卷积功率平均值时,相当于用一个1600阶的均值滤波器对卷积功率进行滤波。1600阶均值滤波器的幅频响应如图3所示。

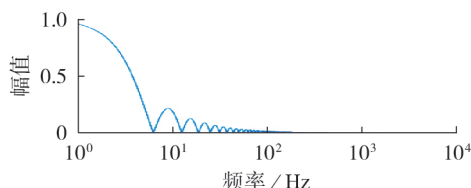


图3 $N^2=1600$ 时均值滤波器的幅频响应图

Fig.3 Amplitude-frequency response diagram of average filter when $N^2=1600$

由图3可以看出,在 $f = kf_s/1600$ ($k=1, 2, \dots, N$; f_s 为采样频率)处,其幅值为0,显然,这是一个低通滤波器。主瓣的带宽为6.25,通带截止频率(以3 dB功率点考虑)约为3 Hz,滤波后的卷积功率可以有效反映低频功率的故障特征,可以利用卷积功率平均值来识别区内故障并定位故障区域。由于数据窗越长,对应的通带截止频率将越小,因此,理论上数据窗只要大于4 ms,均能满足对低频特征提取的要求。但是数据窗越长,对保护速动性的影响将越大。

3 线路保护方案设计

3.1 启动单元

由于直流线路发生故障时,会引起极线电压的快速下落,因此可以利用极线电压行波的变化作为保护的启动单元。故障保护启动判据为:

$$|\Delta u(t)| > \Delta V_{set0} = k_0 U_{ref} \quad (24)$$

式中: $\Delta u(t)$ 为极线电压行波变化量; ΔV_{set0} 为启动整定值; U_{ref} 为额定线电压; k_0 为电压变化系数,取0.08。

3.2 区内故障识别与故障区域确定单元

根据上文分析,可以利用时域下的卷积功率平均值来识别区内故障以及定位故障区域,构造卷积功率平均值之差故障特征量如下:

$$\Delta p_{ave, 3T, i} = p_{ave, C, i} + p_{ave, B1, i} - p_{ave, A, i} \quad (25)$$

$$\Delta p_{ave, 1, i} = p_{ave, B1, i} - p_{ave, A, i} \quad (26)$$

$$\Delta p_{ave, 2, i} = p_{ave, C, i} - p_{ave, B2, i} \quad (27)$$

式中: $i=p, n, p, n$ 分别表示正极线路和负极线路的电气量; $\Delta p_{ave, 3T, i}$ 为直流线路三端的卷积功率平均值

之差; $\Delta p_{ave,1,i}$ 为线路 L_1 两侧的卷积功率平均值之差; $\Delta p_{ave,2,i}$ 为线路 L_2 两侧的卷积功率平均值之差; $p_{ave,A,i}$ 、 $p_{ave,B1,i}$ 、 $p_{ave,B2,i}$ 、 $p_{ave,C,i}$ 分别为测点 A 、 B_1 、 B_2 、 C 处的卷积功率平均值。

根据表1的分析,给出区内故障的故障识别判据如下:

$$\Delta p_{ave,3T,i} > \Delta V_{set3T} \quad (28)$$

式中: ΔV_{set3T} 为线路保护整定值。

当发生区外故障时,卷积功率平均值之差应该为一个负数,但是在双极直流输电系统中,由于耦合作用的存在,对极故障下的卷积功率平均值之差不再严格为负,很有可能是一个数值较小的正数。因此,整定值应该以发生对极金属性故障时对应的最大卷积功率平均值之差为基础,再考虑一定的裕度进行整定,即 $\Delta V_{set} = k_{rel} \Delta p_{ave,max}$ ($\Delta p_{ave,max}$ 可以通过实际系统的电磁暂态仿真计算获得; k_{rel} 为可靠系数,取1.5)。由于在整定判据时考虑了对极故障的情况,因此所提判据还带有故障选极的效果。当 $\Delta p_{ave,3T,p} > \Delta V_{set3T}$ 且 $\Delta p_{ave,3T,n} < \Delta V_{set3T}$ 时,识别为线路正极故障;当 $\Delta p_{ave,3T,n} > \Delta V_{set3T}$ 且 $\Delta p_{ave,3T,p} < \Delta V_{set3T}$ 时,识别为线路负极故障;当 $\Delta p_{ave,3T,p} > \Delta V_{set3T}$ 且 $\Delta p_{ave,3T,n} > \Delta V_{set3T}$ 时,识别为极间故障。

识别出区内故障并确定故障极后,再利用以下判据确定故障区域:

$$\begin{cases} \Delta p_{ave,1,i} > 0, \Delta p_{ave,2,i} < 0 & \text{线路 } L_1 \text{ 故障} \\ \Delta p_{ave,1,i} < 0, \Delta p_{ave,2,i} > 0 & \text{线路 } L_2 \text{ 故障} \\ \Delta p_{ave,1,i} < 0, \Delta p_{ave,2,i} < 0 & \text{T 区母线故障} \end{cases} \quad (29)$$

保护根据识别结果做出相应的动作对故障区域进行故障隔离。

值得注意的是,本文所提故障识别判据同样适用于双端运行方式下的直流输电系统。当线路 L_2 退出,系统以 $LCC-MMC_1$ 双端方式运行时,有 $p_{ave,C,i} = 0$ 、 $p_{ave,B1,i} = p_{ave,B2,i}$,此时式(25)同式(26);当线路 L_1 退出,系统以 MMC_1-MMC_2 双端方式运行时,有 $p_{ave,A,i} = 0$ 、 $p_{ave,B1,i} = -p_{ave,B2,i}$,此时式(25)同式(28)。本文所提故障识别判据能够适应三端混合高压直流输电系统灵活多变的运行方式。同时,潮流方向的改变并不会影响本文所提保护判据的效果。本文所提保护判据利用受端功率减去送端功率的功率差来识别故障,潮流方向的改变只会影响线路功率受端和功率送端的改变,而不会影响到功率差的故障特性。因此,运行方式和潮流方向的改变都不会影响本文所提保护判据的性能,其具有较强的实际工程应用价值。

4 保护判据的性能测试

根据图1所示的系统拓扑结构,参照昆柳龙三端混合高压直流输电工程参数,在PSCAD/EMTDC

中搭建三端混合高压直流输电系统模型进行仿真测试。该三端混合高压直流输电系统采用双极接线方式,换流站均接地。直流线路采用频变参数模型,其中直流线路 L_1 、 L_2 的长度分别为932、557 km。模型参数如附录A表A1所示。

在MATLAB中编写相关程序,并导入所建PSCAD模型的故障仿真数据,验证保护的動作情况。设置测点的采样频率为10 kHz,数据窗长度取4 ms。

4.1 故障保护判据的性能测试

设置不同位置、不同故障类型、不同过渡电阻的区内外故障,保护的整定值如附录A表A2所示,仿真结果如附录A表A3所示。由表可以看出:在各种类型的故障情况下,系统的保护装置均能正确识别区内故障,并定位故障区域。另外,本文所提保护天然带有故障选极的效果:当单极线路发生故障时,非故障极线路的卷积功率平均值之差满足区内故障识别判据,故保护不会误判;当线路发生极间故障时,双极线路上的卷积功率平均值之差均满足区内故障识别判据,2个极均会判为故障极。故障区域发生在线路 L_1 上时, $\Delta p_{ave,1,i} > 0$ 、 $\Delta p_{ave,2,i} < 0$,故识别为线路 L_1 故障;故障区域发生在线路 L_2 上时, $\Delta p_{ave,1,i} < 0$ 、 $\Delta p_{ave,2,i} > 0$,故识别为线路 L_2 故障;故障区域发生在T区汇流母线上时, $\Delta p_{ave,1,i} < 0$ 、 $\Delta p_{ave,2,i} < 0$,故识别为T区母线故障。即使是在600 Ω 的过渡电阻下,保护装置仍然能够正确可靠动作,本文所提保护方案具有较好的过渡电阻耐受能力。

另外,本文所提保护无需设定保护动作延时。按照现有的技术条件,光纤通信的最大传输速率约为200 km/ms^[19]。考虑 L_1 、 L_2 的总长约为1500 km,通信延时大约为8 ms,再加上数据窗时长4 ms,整体动作时长约为12 ms。相比于现有工程中的直流线路后备保护,本文所提保护的動作速度得到了较大的提升,因此完全能够满足混合直流输电系统对直流线路后备保护動作时间的要求。

4.2 数据窗长度的影响

在对电压、电流进行卷积时,选择的数据窗长度不同,得到的卷积功率也会不同。以正极线路的保护为例,验证数据窗长度对保护动作的影响。设置过渡电阻为600 Ω 的线路 L_1 故障、T区汇流母线故障以及区外故障;再设置对极金属性故障。数据窗长度分别取4、5、6 ms,所得卷积功率平均值之差的仿真结果如表2所示。

从表2可以看出,在4、5、6 ms的数据窗长度下虽然保护判据计算的特征量大小略有不同,但是利用本文所提判据均能正确识别出区内故障并定位故障区域,对其性能没有明显的影响。本文综合考虑了保护的可靠性和速动性后,选择4 ms的时间窗。

表2 不同数据窗长度下的故障识别结果

Table 2 Fault identification results under different data window duration

数据窗长度 / ms	故障位置	$\Delta p_{ave, 3T, p}$	$\Delta p_{ave, 1, p}$	$\Delta p_{ave, 2, p}$	识别结果
4	线路 L_1	131	137	-6	正确
	T区母线	113	-22	-10	
	区外	-12	—	—	
	对极	23	—	—	
5	线路 L_1	121	128	-7	正确
	T区母线	103	-25	-10	
	区外	-11	—	—	
	对极	25	—	—	
6	线路 L_1	104	113	-9	正确
	T区母线	90	-23	-11	
	区外	-11	—	—	
	对极	34	—	—	

4.3 采样频率的影响

一般而言,采样频率越高,对保护装置硬件的要求也越高。为了分析采样频率对本文所提判据的影响,设置与4.2节中相同的故障情况,采样频率分别取2.5、5.0、10.0 kHz,此时所得卷积功率平均值之差的仿真结果如表3所示。

表3 不同采样频率下的故障识别结果

Table 3 Fault identification results with different sampling frequencies

采样频率 / kHz	故障位置	$\Delta p_{ave, 3T, p}$	$\Delta p_{ave, 1, p}$	$\Delta p_{ave, 2, p}$	识别结果
2.5	线路 L_1	153	160	-7	正确
	T区母线	124	-28	-14	
	区外	-13	—	—	
	对极	32	—	—	
5.0	线路 L_1	138	145	-7	正确
	T区母线	117	-24	-11	
	区外	-12	—	—	
	对极	30	—	—	
10.0	线路 L_1	131	137	-6	正确
	T区母线	113	-22	-10	
	区外	-12	—	—	
	对极	23	—	—	

从表3可以看出,即使是在2.5、5.0 kHz这样较低的采样频率下保护装置依然能正确识别区内故障并定位故障区域,故本文所提方法不需要太高的采样频率,具有较强的实际工程应用价值。

4.4 同步误差的影响

本文所提方法在判据构成上利用时域卷积功率平均值这一故障特征量来识别区内外故障。在满足故障启动判据后,线路两端各自计算出一定时间窗内的卷积功率平均值,再向对侧传递这一卷积功率平均值。由于故障发生后线路两侧是各自进行故障启动判断的,即使有一侧的故障启动稍有偏移,但由于所计算的卷积功率是取一定时间窗内的平均值,

本身对数据窗的起始时间不是很敏感,因此对于两端数据的同步要求并不高。

为了验证同步性对本文所提保护的影响,设置与4.2节中相同的故障情况,分别考虑0、1、2 ms这3种同步误差情况,所得卷积功率平均值之差的仿真结果如表4所示。

表4 同步误差下的故障识别结果

Table 4 Fault identification results under synchronization error

同步误差 / ms	故障位置	$\Delta p_{ave, 3T, p}$	$\Delta p_{ave, 1, p}$	$\Delta p_{ave, 2, p}$	识别结果
0	线路 L_1	131	137	-6	正确
	T区母线	113	-22	-10	
	区外	-12	—	—	
	对极	23	—	—	
1	线路 L_1	111	117	0	正确
	T区母线	99	-35	7	
	区外	2	—	—	
	对极	20	—	—	
2	线路 L_1	74	80	6	正确
	T区母线	76	-58	12	
	区外	13	—	—	
	对极	25	—	—	

由表4可以看出,即使是存在2 ms的同步误差,保护仍然可以正确动作。数据不同步虽然会使保护判据计算的特征量大小略有不同,但整定值有足够的裕度保证保护的选择性和可靠性。故本文所提保护对两端数据的同步要求并不高。

4.5 噪声干扰的影响

大部分的行波保护和纵联方向保护都容易受到噪声干扰的影响,但差动保护则有着良好的抗噪声干扰能力。给本文所提保护分别加上信噪比为30、20、10 dB的高斯白噪声干扰,所得卷积功率平均值之差的仿真结果如附录A表A4所示。由表中可以看出,即使加入10 dB的白噪声干扰,保护依然能够可靠动作。这是因为本文所提保护利用低频功率差的极性差异识别区内外故障,具有充足的裕度。并且噪声属于高频信号,卷积功率在经过均值滤波处理后,滤除了高频信号,不易受到噪声干扰的影响,因此本文所提保护方案具有较强的抗噪声干扰能力。

4.6 与其他方法的对比

1) 与改进电流差动保护的对比。

文献[12]利用线性分布电压计算沿线分布电容电流并对其补偿后,提出了一种基于差动电流零模量的新型直流线路差动保护方案。整流侧发生区外故障时,差流补偿后的仿真结果如附录A图A5所示。由图可见:补偿前,由于分布电容电流的影响,差动电流零模量在故障发生的起始阶段会超过最小动作电流;而经过补偿后,上述情况可以得到有效的改善;而在一定的同步误差(2 ms)情况下,区外故障

下的差动电流中仍然会出现较大的不平衡电流,从而对保护的動作性能造成一定的影响。因此,改进后的电流差动保护仍然对双端数据的同步有较高的要求。

而本文所提方法由于所计算的卷积功率是取一定时间窗内的平均值,本身对数据窗的起始时间不是很敏感,因此具有更好的可靠性。同时,本文所提方法可以在 $600\ \Omega$ 的过渡电阻下正确识别区内故障,具有较好的灵敏性。

2)与单端量保护的对比。

文献[20]提出了一种基于卷积功率的单端量保护,它利用线路边界对高频卷积功率的衰减来识别区内外故障。单端量保护利用线路单端的故障信息进行故障识别,灵敏性有限,在高阻故障下可能会发生保护拒动。文献[20]所提方法在过渡电阻耐受能力方面的仿真结果如附录A表A5所示。表中: E_{M1} 为基于卷积功率的高频暂态能量; ΔV_{set4} 为保护整定值。从表A5可以看出,当直流线路 L_1 发生 $600\ \Omega$ 的单极接地故障时,单端量保护出现拒动,保护的灵敏性不足;而从表A3可以看出,即使是在 $600\ \Omega$ 的过渡电阻下,本文所提保护仍然能够正确识别区内故障并准确定位故障区域。

再给单端量保护加上30 dB的白噪声干扰,仿真结果如附录A表A6所示。从表A6中可以看出,高频卷积功率 E_{M1} 在30 dB的白噪声下受到明显干扰,已经无法利用其进行区内外故障的识别;而从表A4可以看出,本文所提保护方案在30、20、10 dB的白噪声下均可以正确可靠动作,具有更强的抗噪声干扰能力。

5 结论

本文以三端混合高压直流输电系统为对象,提出了一种基于时域卷积功率平均值之差的快速纵联保护方法。该保护方法利用时域卷积功率实现对S域功率特征的有效提取,并通过构造卷积功率平均值之差判据,实现了三端混合高压直流线路故障的可靠识别以及故障区域的准确定位。该保护方案具有以下优点:

1)能够快速识别区内故障,并准确定位故障区段,还具有故障选极的特性;

2)抗干扰能力较强,且无需严格数据同步,具有较高的可靠性;

3)能适应系统不同的运行方式,对数据采样频率的要求低,数据通信量小,具有较强的实际工程实用价值。

综上,本文所提方法对实际多端混合高压直流输电工程线路保护具有一定的理论和实用参考价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 祝新驰,李海锋,黄烜超,等. 基于触发角变化特性的高压直流线路纵联保护[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):163-171.
ZHU Xinchu, LI Haifeng, HUANG Dachao, et al. Pilot protection of HVDC power transmission lines based on variation characteristics of firing angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 163-171.
- [2] 刘海金,李斌,温伟杰,等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术,2021,45(9):3463-3477.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3477.
- [3] 杨赛昭,向往,文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6600-6617.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6617.
- [4] 陈鑫全,李海锋,顾广坤,等. 基于时域电压比的高压直流输电线路暂态保护方案[J]. 电力系统自动化,2020,44(22):62-69.
CHEN Xinquan, LI Haifeng, GU Guangkun, et al. Transient protection scheme of HVDC transmission line based on time-domain voltage ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 62-69.
- [5] 侯俊杰,宋国兵,常仲学,等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化,2019,43(21):203-212.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 203-212.
- [6] 戴志辉,刘宁宁,刘媛,等. 基于电压反行波的特高压直流输电单端量线路保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):80-87.
DAI Zhihui, LIU Ningning, LIU Yuan, et al. Single-terminal line protection for UHVDC power transmission based on voltage backward traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 80-87.
- [7] CHU Xu. Transient numerical calculation and differential protection algorithm for HVDC transmission lines based on a frequency-dependent parameter model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 108: 107-116.
- [8] GAO Shuping, LIU Qi, SONG Guobing. Current differential protection principle of HVDC transmission system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1286-1292.
- [9] 郑俊超,文明浩,秦瑜,等. 具备故障选极能力的高压直流输电线路差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4350-4358,4635.
ZHENG Junchao, WEN Minghao, QIN Yu, et al. A novel differential protection scheme with fault line selection capability for HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4350-4358, 4635.
- [10] 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):1251-1259.
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): 1251-1259.
- [11] 戴志辉,张程,何永兴,等. 基于行波调谐能量的高压直流线路纵联保护[J]. 电网技术,2020,44(7):2710-2721.
DAI Zhihui, ZHANG Cheng, HE Yongxing, et al. Pilot protection based on traveling wave tuning energy for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2710-

- 2721.
- [12] 杨亚宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于计算电阻的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 84-94.
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Pilot protection of HVDC transmission lines based on calculated resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 84-94.
- [13] 杨亚宇, 邵能灵, 刘剑, 等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015(22): 5757-5767.
YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(22): 5757-5767.
- [14] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 52-56, 86.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 52-56, 86.
- [15] 李海锋, 祝新驰, 梁远升, 等. 基于电流控制补偿的高压直流线路快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 111-119.
LI Haifeng, ZHU Xinchu, LIANG Yuansheng, et al. Fast differential protection for HVDC transmission line based on current control compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 111-119.
- [16] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3873-3885.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3873-3885.
- [17] 李海锋, 张坤, 王钢, 等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 119-125, 179.
LI Haifeng, ZHANG Kun, WANG Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 119-125, 179.
- [18] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 293-301.
- [19] PETINO C, HEIDEMANN M, EICHHOFF D, et al. Application of multilevel full bridge converters in HVDC multiterminal systems[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 297-304.
- [20] CHEN Xinquan, LI Haifeng, WANG Gang, et al. A convolution power-based protection scheme for hybrid multiterminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1655-1667.

作者简介:



李海锋

李海锋(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护(E-mail: lihf@scut.edu.cn);

褚倍钰(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护(E-mail: chubeiyu1997@163.com);

梁远升(1980—),男,副教授,博士,主要研究方向为电力系统故障分析与继电保护(E-mail: ysliang@scut.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Fast pilot protection method of multi-terminal hybrid HVDC line based on time-domain differential convolution power

LI Haifeng¹, CHU Beiyu¹, LIANG Yuansheng¹, DENG Chengjiang², WANG Gang¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Branch of China Southern Power Grid Extra High Voltage Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to solve the problems that the existing direct current (DC) line differential protections are not fast enough and the data of two terminals need to be strictly synchronized, the power characteristics of different faults in S-domain is mathematically analyzed with the three-terminal hybrid high voltage direct current (HVDC) transmission system taken as the object. It is found that using the differential power characteristics in S-domain can effectively distinguish the internal and external faults and accurately locate the fault areas. On this basis, convolution power as a kind of time-domain fault characteristic quantity is constructed to realize the effective extraction of power feature in S-domain, and then a fast pilot protection method for multi-terminal hybrid HVDC line based on differential convolution power is proposed. The simulation based on PSCAD/EMTDC shows that the proposed method can correctly identify the internal faults and locate the fault areas within the data window of 4 ms / 10 kHz, and has fault pole selection characteristics, without the need for strict synchronization of data at both ends, and has high reliability, sensitivity and anti-interference ability.

Key words: multi-terminal hybrid HVDC; line protection; convolution power; pilot protection; relay protection

附录 A

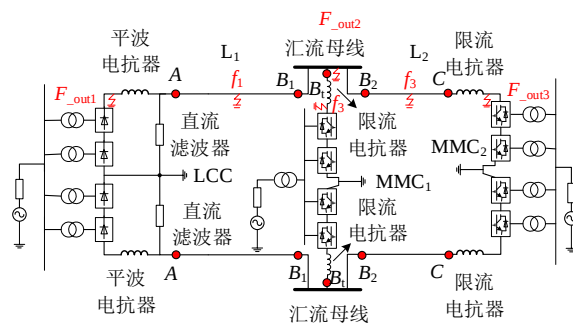


图 A1 三端混合高压直流输电系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of three-terminal hybrid HVDC transmission system

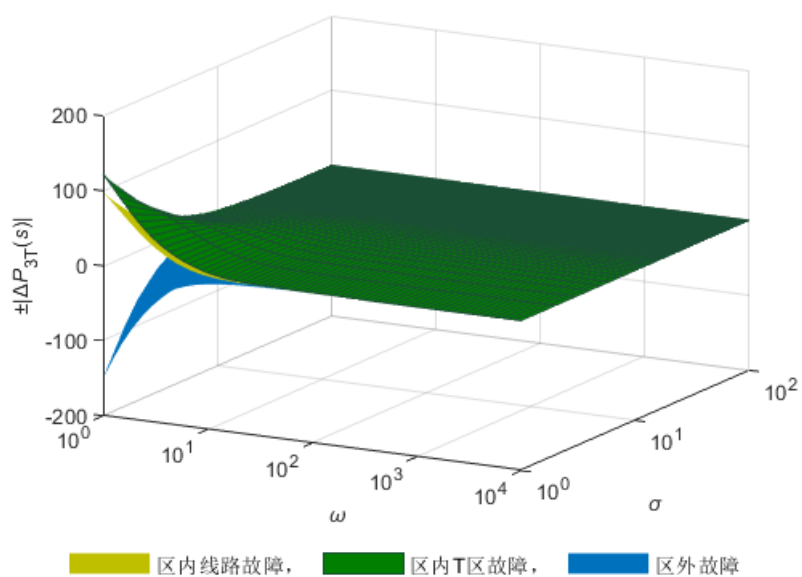


图 A2 $\Delta P_{3T}(s)$ 的幅值三维曲线图

Fig.A2 Three-dimensional graph of amplitude of $\Delta P_{3T}(s)$

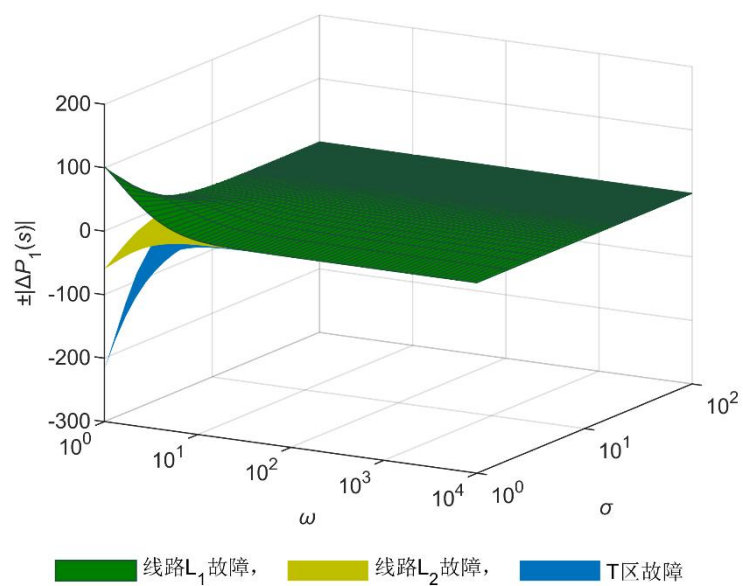


图 A3 $\Delta P_1(s)$ 的幅值三维曲线图
Fig.A3 Three-dimensional graph of amplitude of $\Delta P_1(s)$

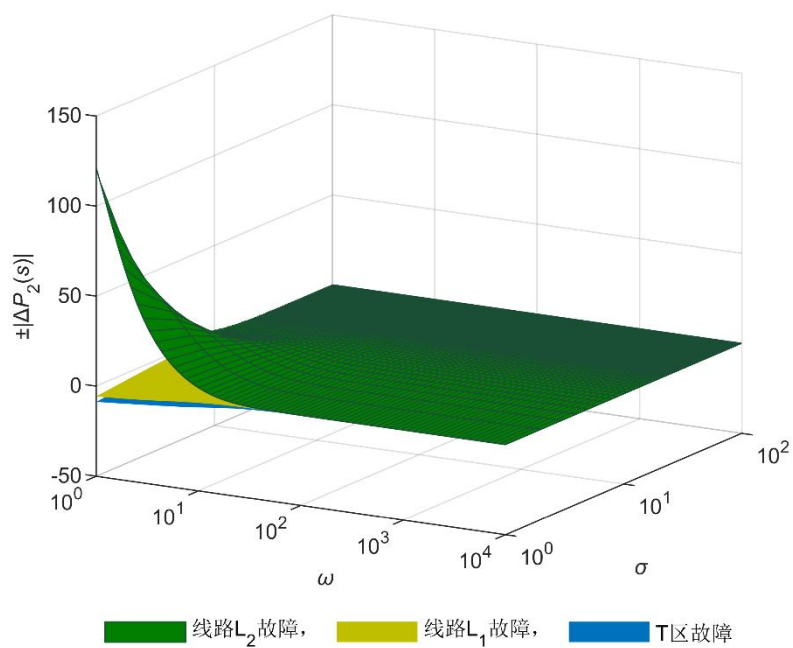


图 A4 $\Delta P_2(s)$ 的幅值三维曲线图
Fig.A4 Three-dimensional graph of amplitude of $\Delta P_2(s)$

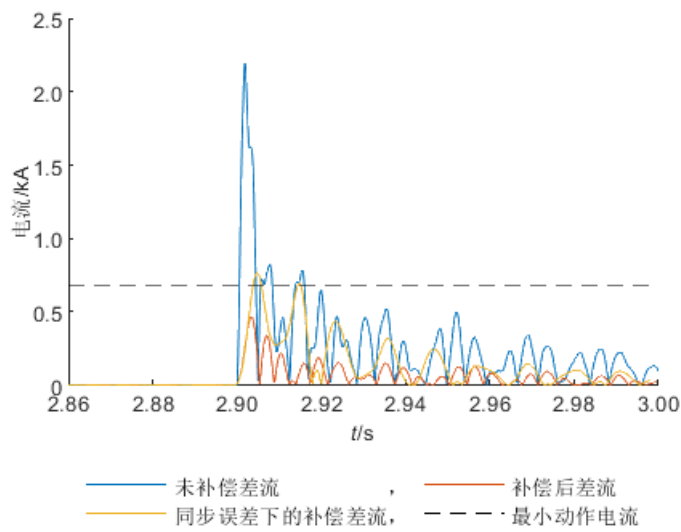


图 A5 整流侧区外故障下的仿真结果

Fig.A5 Simulative results of external fault at rectifier side

表 A1 三端混合直流输电系统模型参数

TableA1 Model parameters of hybrid three terminal HVDC system

参数	参数值		
	LCC 站	MMC ₁ 站	MMC ₂ 站
额定功率/MW	8000	3000	5000
额定直流电流/A	5000	1875	3125
额定直流电压/kV	±800	±800	±800
控制方式	定电流控制	定有功控制	定直流电压控制
边界元件阻抗/H	0.15	0.1	0.075

表 A2 保护整定值

Table A2 Protection setting value

整定值	k_0	ΔV_{set0}	k_{rel}	ΔV_{set3T}
取值	0.08	64	1.5	35

表 A3 故障识别结果
Table A3 Fault identification results

故障区域	故障类型	故障位置 /km	过渡电阻 /Ω	$\Delta p_{ave,3T,p}$	$\Delta p_{ave,3T,n}$	$\Delta p_{ave,1,p}$	$\Delta p_{ave,1,n}$	$\Delta p_{ave,2,p}$	$\Delta p_{ave,2,n}$	识别结果
L ₁	正极故障	200	0	3180	-20	3335	—	-155	—	L ₁ 正极故障
			300	380	-5	395	—	-15	—	
			600	141	-2	145	—	-5	—	
		400	0	3001	-25	3186	—	-184	—	
			300	364	-3	384	—	-20	—	
			600	131	-1	137	—	-6	—	
		800	0	4151	-17	4519	—	-369	—	
			300	342	-1	369	—	-27	—	
			600	113	0	121	—	-8	—	
	双极故障	200	0	5791	5789	5964	5964	-174	-174	L ₁ 正极、负极故障
			150	1998	1997	2072	2072	-74	-74	
			300	1019	1018	1062	1063	-44	-45	
		400	0	5992	5995	6165	6169	-172	-174	
			150	2005	2006	2065	2066	-60	-60	
			300	988	988	1018	1018	-29	-30	
		800	0	7591	7593	7840	7845	-248	-255	
			150	2103	2104	2181	2184	-78	-79	
			300	964	965	1001	1002	-37	-37	
L ₂	正极故障	100	0	3578	-3	-545	—	4124	—	L ₂ 正极故障
			300	353	0	-58	—	411	—	
			600	121	0	-23	—	144	—	
		300	0	2909	-12	-322	—	3230	—	
			300	359	-3	-39	—	398	—	
			600	128	-2	-18	—	146	—	
		500	0	3473	1	-197	—	3670	—	
			300	389	-2	-24	—	412	—	
			600	134	-1	-11	—	145	—	
	双极故障	100	0	5976	5977	-162	-164	6138	6143	L ₂ 正极、负极故障
			150	1952	1954	-84	-86	2036	2039	
			300	943	943	-43	-43	986	986	
		300	0	5558	5568	-127	-128	5684	5696	
			150	1866	1867	-54	-54	1920	1921	
			300	920	920	-32	-32	951	951	
		500	0	5386	5388	-115	-116	5502	5505	
			150	1908	1906	-56	-56	1964	1963	
			300	936	937	-34	-34	970	971	
T 区母线	正极故障	—	0	5415	7	-834	—	-518	—	T 区母线正极故障
			300	352	0	-61	—	-32	—	
			600	113	0	-22	—	-10	—	
区外故障	/	F _{out1}	0	-741	18	—	—	—	—	区外故障
			300	-42	0	—	—	—	—	
			600	-12	0	—	—	—	—	
		F _{out2}	0	-948	-41	—	—	—	—	
			300	-62	-2	—	—	—	—	
			600	-22	0	—	—	—	—	
		F _{out3}	0	-795	-11	—	—	—	—	
			300	-68	-2	—	—	—	—	
			600	-25	-1	—	—	—	—	

表 A4 白噪声下的故障识别结果

Table A4 Fault identification results under white noise

白噪声/dB	故障类型	$\Delta p_{ave,3T,p}$	$\Delta p_{ave,1,p}$	$\Delta p_{ave,2,p}$	识别结果
30	线路 L ₁	131	138	-6	正确
	T 区母线	113	-23	-10	
	区外故障	-12	—	—	
	对极故障	22	—	—	
20	线路 L ₁	131	138	-6	正确
	T 区母线	112	-22	-11	
	区外故障	-12	—	—	
	对极故障	21	—	—	
10	线路 L ₁	127	137	-6	正确
	T 区母线	116	-18	-13	
	区外故障	-13	—	—	
	对极故障	25	—	—	

表 A5 单端量保护故障识别结果

Table A5 Fault identification results of single-terminal protection

故障类型	过渡电阻 / Ω	故障方向	E_{M1}	ΔV_{set4}	识别结果
线路 L ₁ 故障	0	(1,0)	41.85	0.67	正确
	300	(1,0)	4.90		正确
	600	(1,0)	0.24		错误
区外故障	0	(1,0)	0.56	0.67	正确
	300	(1,0)	0.28		正确
	600	(1,0)	0.30		正确

表 A6 噪声干扰下单端量保护的故障识别结果

Table A6 Fault identification results of single-terminal protection under white noise

故障类型	过渡电阻 / Ω	故障方向	E_{M1}	Δset_4	识别结果
线路 L ₁ 故障	0	(1,0)	330.3	400	错误
	300	(1,0)	11.8		错误
	600	(1,0)	1.4		错误
区外故障	0	(1,0)	333.2	400	正确
	300	(1,0)	1.5		正确
	600	(1,0)	0.5		正确