

基于故障电流传播特性的高压直流输电线路单端保护方案

戴文睿, 张海强, 牟大林, 刘磊, 林圣

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:针对高压直流输电线路现有行波保护故障识别准确率不高、耐过渡电阻能力不强等问题,提出一种基于故障电流传播特性的单端保护方案。基于高压直流输电系统的等效电路,分别分析故障电流从换流侧到线路、从线路到换流侧以及在线路上的传播特性,进而分析不同位置发生故障时整流站线路边界两侧故障电流特征的差异性。基于此,利用特征频段电流构造区内、区外故障的识别判据,设计直流线路单端保护方案。基于PSCAD/EMTDC软件的仿真结果表明,所提保护方案能够准确识别区内、外故障,且具有良好的耐过渡电阻及抗噪声干扰能力。

关键词:高压直流输电;输电线路;单端保护;等效电路;电流传播特性;线路边界测点电流

中图分类号:TM 721.1;TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909016

0 引言

高压直流输电线路长且工作环境复杂,发生故障的概率较高^[1-3]。直流输电线路保护的准确动作对保障系统的安全性与可靠性具有重大的意义^[4-6]。

我国已投运的高压直流输电工程采用行波保护作为主保护,其利用行波波头的变化量和变化率特征构建保护判据。然而,线路区内高阻故障下的行波特征不明显,保护计算结果将无法达到保护动作阈值,保护拒动;区外(尤其是逆变侧区外)发生金属性或低阻接地故障时,其故障电流的时域特征存在与区内接地故障近似的情况,易引起保护的误动。简言之,传统的行波保护在实际运行中存在故障识别准确率不高、耐过渡电阻能力不强等问题^[7-9]。

为了提高直流输电线路保护的可靠性与灵敏性,国内外专家学者进行了大量的研究^[10-18],文献[10]利用线路两侧的电压、电流突变量在区内和区外故障下的特征构成判据,提高了保护耐过渡电阻的能力,但对数据同步的要求较高;文献[11]提出了一种基于线路两侧边界特定频段暂态能量比值的纵联保护方案,能够准确地选择故障极,对数据的同步要求低,但没有考虑分布电容电流对保护的影响;文献[12]在考虑了直流线路分布电容的基础上,通过计算沿线分布电流,提出了不受波头检测准确性影响的保护方案,但运算量较大,对数据处理的要求高。以上文献所提的保护方案提高了现有保护耐受

过渡电阻的能力和对故障识别的准确性,但仍存在对通信要求高和保护速动性不足等问题,因此,大量学者开展了对单端保护的研究。文献[13]对故障行波信息进行了频谱分析,并从信号频谱、波头到达时间中发现了其与故障位置、网络拓扑结构的关系,通过融合时频域信息提出了单端保护方案;文献[14]提取了故障信号全波的时频频谱矩阵,采用波形对比技术识别不同类型的故障特征,有较好的抗过渡电阻能力;文献[15]利用多分辨形态梯度变换提取故障暂态电流行波的形态谱,通过比较形态谱的频域特征提出区内、外故障的判据,具有较强的选择性。文献[13-15]从行波在输电系统中的传播规律角度深入研究了故障信号的时频特征,但算法复杂度较高,不利于保护的快速动作。文献[16-18]分析了输电线路物理边界的阻抗-频率特性,根据线路边界对高频分量的衰减作用,分别利用高频分量的能量和特征频点电流的幅值判断区内、外故障,对采样率的要求不高,保护计算速度相对较快,但存在未考虑输电线路对所用信号的衰减、保护特征信号能量小等问题,导致保护对线路远端区内故障和对端区外故障的区分程度不高,可靠性有所不足。

针对以上问题,本文基于直流输电系统的等效电路,分别分析了故障电流由换流侧到线路、线路到换流侧和在线路上的传播特性,进而推导了区内和区外故障下的电流表达,分析了故障特征在特定频段下的差异性。基于此,利用多分辨小波变换手段提取故障电流在特定频段的信号,构建保护判据,实现了线路的单端保护。大量的仿真结果表明,所提保护方案能够可靠识别区内、外故障,且具有良好的耐过渡电阻及抗噪声干扰性能。

1 故障电流传播特性分析

1.1 高压直流输电系统的结构

典型的高压直流输电系统的结构图如图1所

收稿日期:2019-04-29;修回日期:2019-07-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900603);四川省科技计划项目(2018GZ0392);国家电网公司科技项目(52094017000W)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900603),the Science and Technology Project of Sichuan Province(2018GZ0392) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52094017000W)

示,图中 F_1 为线路区内故障, F_2 — F_5 为在不同位置的区外故障,分别为整流侧直流母线故障、逆变侧直流母线故障、整流侧交流母线故障和逆变侧交流母线故障。实际工程中,整流侧线路边界两侧均安装有分流器,分流器1和分流器2测得的电流分别为 i_1 和 i_2 。

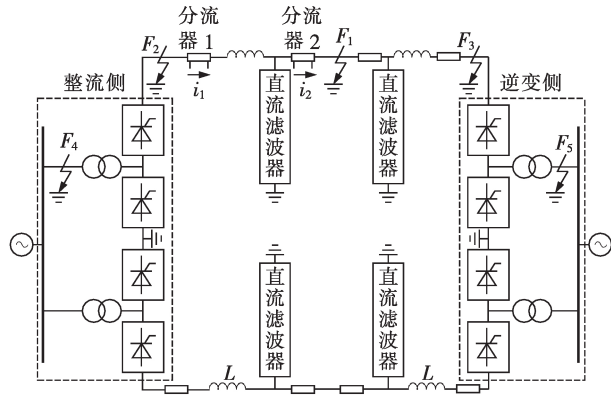


图1 高压直流输电系统的结构及线路故障

Fig.1 Structure and line faults of HVDC system

系统的等效电路如图2所示。图中,整流侧与逆变侧均由换流器、换流变压器等组成,将其视为1个恒定电压源与1个电感相串联^[8,19]。整流侧的等效阻抗为 $Z_r(\omega)$,逆变侧的等效阻抗为 $Z_i(\omega)$,线路边界平波电抗器、直流滤波器的阻抗分别为 $Z_L(\omega)$ 、 $Z_f(\omega)$,输电线路的波阻抗为 $Z_c(\omega)$ 。实际系统中,直流滤波器、电抗器及线路波阻抗均可以通过其设计参数计算得到。

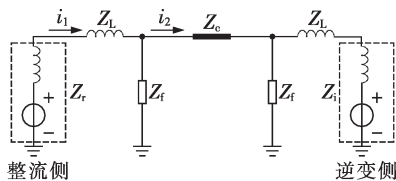


图2 系统的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of system

1.2 不同位置的电流传播特性

1.2.1 故障电流从换流侧向线路传播的特性

当故障电流 i_F 从整流侧直流母线向线路侧传播时,根据基尔霍夫电流定律,电流将会在节点处分流,其分流支路如图3中的虚线框所示。类似地,当故障电流 i_F 从逆变侧流向线路时也具有相同的传播

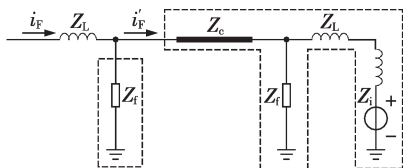


图3 电流由换流侧流向线路时的传播特性

Fig.3 Propagation characteristic of current flowing from converter side to line

特性。

定义频率为 ω 的电流传播特性函数为该频率下流出某一节点的电流与流入该节点的电流的比值。当故障电流从换流侧流向线路时,根据图3可得其传播特性函数为:

$$H_1(\omega) = \frac{|i'_F(\omega)|}{|i_F(\omega)|} = \frac{|Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega) + Z_c(\omega) + Z_f(\omega) // (Z_h(\omega) + Z_L(\omega))|} \quad (1)$$

其中,当故障电流从整流侧流向线路时, $Z_h(\omega) = Z_r(\omega)$;当故障电流从逆变侧流向线路时, $Z_h(\omega) = Z_i(\omega)$ 。

1.2.2 线路上的传播特性

故障电流在均匀输电线路上的传播示意图如图4所示。根据输电线路的波动方程可知^[20],线路上距故障点 l 处的故障电流 $i'_F(l, \omega)$ 与故障初始电流 $i_F(0, \omega)$ 的关系为:

$$i'_F(l, \omega) = \sinh(\gamma l) \frac{U(0, \omega)}{Z_c(\omega)} + \cosh(\gamma l) i_F(0, \omega) \quad (2)$$

其中, $U(0, \omega)$ 为故障点的对地电压; γ 为线路传播系数。

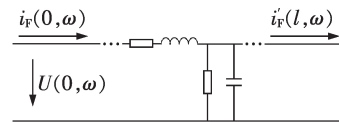


图4 电流在输电线路上的传播示意图

Fig.4 Schematic diagram of current propagation along a transmission line

考虑故障点的对地电压 $U(0, \omega)$ 近似为0,因此故障电流在线路上的传播特性函数可表示为:

$$H_2(\omega) = \frac{|i'_F(l, \omega)|}{|i_F(0, \omega)|} = \cosh(\gamma l) \quad (3)$$

1.2.3 故障电流从线路向换流侧传播的特性

与上述原理相同,当故障电流 i_F 从线路向整流侧传播时,电流将会在分流节点处进行分流,其分流支路如图5中的虚线框所示。当故障电流 i_F 从线路流向逆变侧时也具有相同的传播特性。

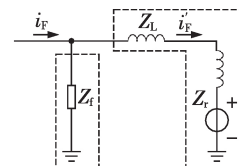


图5 电流由线路流向换流侧时的传播特性

Fig.5 Propagation characteristic of current flowing from line to converter side

因此,故障电流从线路向换流侧传播的特性函

数为:

$$H_3(\omega) = \frac{|i'_F(\omega)|}{|i_F(\omega)|} = \frac{|Z_f(\omega)|}{|Z_h(\omega) + Z_L(\omega) + Z_f(\omega)|} \quad (4)$$

其中,当故障电流从线路流向整流侧时, $Z_h(\omega) = Z_r(\omega)$;当故障电流从线路流向逆变侧时, $Z_h(\omega) = Z_i(\omega)$ 。

1.3 基于传播特性的故障电流表达

当高压直流输电系统发生故障时,故障电流经历不同的传播环节到达整流侧线路边界两侧,即系统整流侧线路边界两侧的故障电流 i_1 和 i_2 可由故障电流 i_F 和相应的电流传播特性函数来表达。

如图1所示,当逆变侧区外发生故障 F_3 时,故障电流 i_F 将经过逆变侧线路边界和输电线路传播至整流侧线路边界近线路侧,此时由分流器2测得的电流为 i_2 ;根据电流从逆变侧向线路传播的特性和电流在线路上的传播特性,可得电流 i_2 的表达式如式(5)所示。同时, i_2 将经过整流侧线路边界传播至整流器出口侧,此时由分流器1测得的电流为 i_1 ;根据电流从线路向整流侧传播的特性,可得其表达式如式(6)所示。

$$i_2(\omega) = i_F(\omega) H_1(\omega) H_2(\omega) \quad (5)$$

$$i_1(\omega) = i_F(\omega) H_1(\omega) H_2(\omega) H_3(\omega) \quad (6)$$

定义线路的边界测点电流比值为 $C(\omega) = \frac{|i_2(\omega)|}{|i_1(\omega)|}$,

则当发生逆变侧区外故障时,边界测点电流比值 $C_{F_3}(\omega)$ 为:

$$C_{F_3}(\omega) = \frac{|i_2(\omega)|}{|i_1(\omega)|} = \frac{|i_F(\omega)| H_1(\omega) H_2(\omega)}{|i_F(\omega)| H_1(\omega) H_2(\omega) H_3(\omega)} = \frac{1}{H_3(\omega)} = \frac{|Z_r(\omega) + Z_L(\omega) + Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega)|} \quad (7)$$

同理,当输电线路区内发生接地故障 F_1 时,电流 i_2 和 i_1 的表达式分别如式(8)和式(9)所示。

$$i_2(\omega) = i_F(\omega) H_2(\omega) \quad (8)$$

$$i_1(\omega) = i_F(\omega) H_2(\omega) H_3(\omega) \quad (9)$$

此时,边界测点电流比值为:

$$C_{F_1}(\omega) = \frac{|Z_r(\omega) + Z_L(\omega) + Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega)|} \quad (10)$$

当整流侧区外发生接地故障 F_2 时,电流 i_2 和 i_1 的表达式分别如式(11)和式(12)所示。

$$i_2(\omega) = i_F(\omega) H_1(\omega) \quad (11)$$

$$i_1(\omega) = i_F(\omega) \quad (12)$$

此时,边界测点电流比值为:

$$C_{F_2}(\omega) = \frac{|Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega) + Z_c(\omega) + Z_f(\omega) // (Z_i(\omega) + Z_L(\omega))|} \quad (13)$$

2 区内、外故障特征分析

2.1 正向故障和反向故障特征分析

本文中的正向故障是指线路区内发生故障及逆变侧区外发生故障,反向故障是指整流侧区外发生故障。

直流输电系统中架空输电线路可以视为阻感性元件^[21],换流站在1.2 kHz以上频率范围亦可以等效为1个集中电感^[8]。同时,目前直流输电工程中常用的直流滤波器为三调谐滤波器和双调谐滤波,图6为贵广直流输电工程三调谐直流滤波器^[22]以及灵绍直流输电工程双调谐直流滤波器^[23]的阻抗特性曲线。

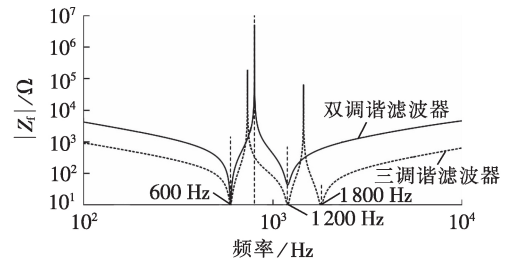


图6 直流滤波器的阻抗特性曲线

Fig.6 Impedance characteristic curves of DC filters

以图6中的三调谐滤波器为例,该直流滤波器在频率大于1.8 kHz范围内呈感性。因此,当频率大于1.8 kHz时,式(7)、式(10)和式(13)将满足以下所示关系:

$$C_{F_1}(\omega) = C_{F_3}(\omega) = \frac{|Z_r(\omega) + Z_L(\omega) + Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega)|} > \frac{|Z_L(\omega) + Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega)|} = C_{f,\min}(\omega) \quad (14)$$

$$C_{F_2}(\omega) = \frac{|Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega) + Z_c(\omega) + Z_f(\omega) // (Z_i(\omega) + Z_L(\omega))|} < \frac{|Z_f(\omega)|}{|Z_f(\omega) + Z_c(\omega) + Z_f(\omega) // Z_L(\omega)|} = C_{b,\max}(\omega) \quad (15)$$

根据式(14)和式(15),可得到发生正向故障时的最小线路边界测点电流比值 $C_{f,\min}(\omega)$ 以及发生反向故障时的最大边界测点电流比值 $C_{b,\max}(\omega)$,波形如图7所示。

由图7可看出,在1.8 kHz以上频段,正向故障的 $C_{f,\min}(\omega)$ 将恒大于反向故障的 $C_{b,\max}(\omega)$,即在高于三调谐直流滤波器最高调谐频率的范围内,发生任意正向故障时的边界测点电流比值 $C(\omega)$ 都始终大

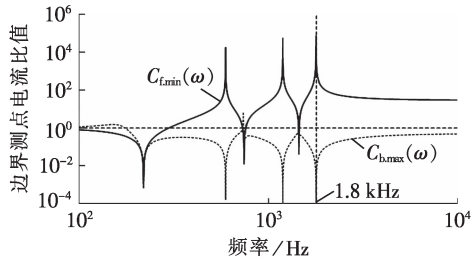


图7 正、反向故障测点电流比值(三调谐滤波器)

Fig.7 Measurement point current ratio of forward and reverse faults (triple-tuned filter)

于发生反向故障时的值。

当直流输电系统采用双调谐直流滤波器时,也可以由类似的推导过程得到在双调谐直流滤波器情况下的正向和反向故障测点电流比值,结果如图8所示。

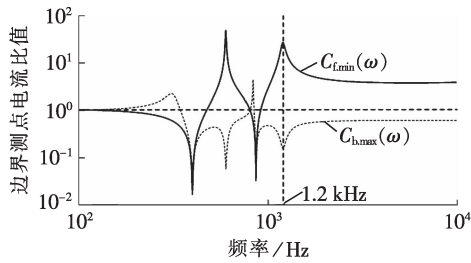


图8 正、反向故障测点电流比值(双调谐滤波器)

Fig.8 Measurement point current ratio of forward and reverse faults (double-tuned filter)

由图8可看出,在1.2 kHz以上频段,正向故障的 $C_{tmin}(\omega)$ 将恒大于反向故障的 $C_{bmax}(\omega)$,即在高于双调谐直流滤波器最高调谐频率的范围内,发生任意正向故障时的边界测点电流比值 $C(\omega)$ 都始终大于发生反向故障时的值。

综上所述,可以通过求取直流滤波器最高调谐频率以上频段范围内边界测点电流比值 $C(\omega)$ 的和,来获得更加显著的正向故障与反向故障之间的特征差异。

2.2 区内故障和正向区外故障的特征分析

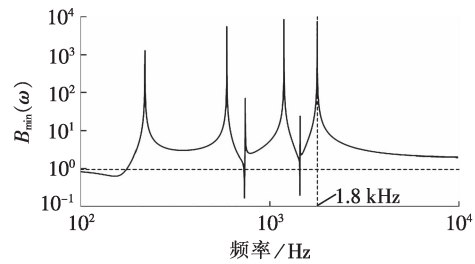
定义区内线路末端发生故障的情况下分流器2测得的电流 i_{2,F_1} 与发生正向区外故障(即逆变侧区外故障 F_3)情况下分流器2测得的电流 i_{2,F_3} 的比值为 $B(\omega)$ 。当区内、外故障的严重程度相同,即故障电流 i_F 相等时,可求得 $B(\omega)$ 为:

$$B(\omega) = \frac{i_{2,F_1}(\omega)}{i_{2,F_3}(\omega)} = \frac{|i_F(\omega)| H_2(\omega)}{|i_F(\omega)| H_1(\omega) H_2(\omega)} = \frac{|Z_f(\omega) + Z_w(\omega) + Z_f(\omega) // (Z_r(\omega) + Z_L(\omega))|}{|Z_f(\omega)|} \quad (16)$$

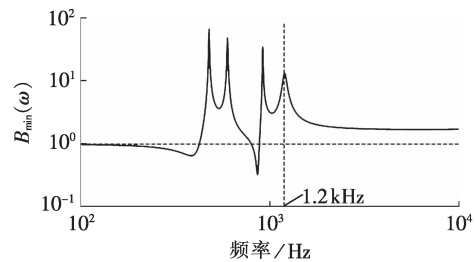
以三调谐滤波器为例,在高于1.8 kHz频段的范围内,式(16)满足:

$$B(\omega) > \frac{|Z_f(\omega) + Z_w(\omega) + Z_f(\omega) // Z_L(\omega)|}{|Z_f(\omega)|} = B_{min}(\omega) \quad (17)$$

根据式(17)可以给出 $B_{min}(\omega)$ 的曲线如图9所示。由图9可以知道,在高于三调谐直流滤波器最高调谐频率1.8 kHz的频段,区内线路末端发生故障时分流器2测得的电流大于逆变侧区外发生故障时所测得的电流值;同时,由于线路对高频分量的衰减特性,在线路其他位置发生故障时由分流器2测得的电流将必然大于线路末端发生故障时所测得的电流值。

图9 $B_{min}(\omega)$ 曲线(三调谐滤波器)Fig.9 Curve of $B_{min}(\omega)$ (triple-tuned filter)

当直流输电系统采用双调谐直流滤波器时,也可以由类似的推导过程得到在双调谐直流滤波器情况下的正、反向故障测点电流比值,结果如图10所示。

图10 $B_{min}(\omega)$ 曲线(双调谐滤波器)Fig.10 Curve of $B_{min}(\omega)$ (double-tuned filter)

由图10可知,在高于双调谐直流滤波器最高调谐频率1.2 kHz的频段,区内线路末端发生故障时分流器2测得的电流大于逆变侧区外发生故障时所测得的电流值。

因此,当区内线路发生故障时,线路边界近线路侧测点电流 i_2 在直流滤波器最高调谐频率以上的分量将恒大于逆变侧区外发生故障时的电流值。故可求取电流 i_2 在位于该频段的幅值和,以区分正向区内故障和正向区外故障。

3 保护方案

基于上述分析,采用直流滤波器最高调谐频率

以上频段内整流侧线路边界两侧测点电流 i_1 和 i_2 特征可以实现线路区内故障与区外故障的识别,构建线路单端保护判据如下:

$$M_c = |i_{2s}(k)| \ln \left(\frac{|i_{2s}(k)|}{|i_{1s}(k)|} \right) > M_{set} \quad (18)$$

其中, N 为数据窗内的采样点个数; M_{set} 为保护整定值; $|i_{1s}(k)|$ 、 $|i_{2s}(k)|$ 分别为电流 i_1 、 i_2 在特征频段内的幅值。

基于此,本文所提高压直流输电线路单端量保护方案如下。

(1) 以 100 kHz 的采样频率实时采集边界两侧电流 i_1 、 i_2 , 为了保证保护的可靠性和速动性, 保护计算的数据窗长设置为 2.5 ms, 数据窗的滑动间隔为 0.1 ms。

(2) 采用文献[16]所提方法对故障线路进行选极。采用多分辨小波分析方法对电流信号进行 5 层小波分解, 当输电系统采用三调谐滤波器时, 采用第 4 层, 即 3 125 ~ 6 250 Hz 频段的小波重构信号进行保护计算; 当输电系统采用双调谐滤波器时, 采用第 5 层, 即 1 562.5 ~ 3 125 Hz 频段的小波重构信号进行保护计算, 获得 M_c 。

(3) 若 M_c 连续 3 次大于保护整定值, 则判定发生了线路区内故障, 保护动作。

4 仿真测试及适应性分析

4.1 仿真参数

为了验证本文所提保护方案的可行性、适应性, 在 PSCAD / EMTDC 中搭建如图 1 所示的 ± 800 kV 直流输电系统仿真模型, 系统输送功率为 8 000 MW, 额定电流为 5 kA, 线路全长 1 500 km, 具体参数可参考文献[24], 直流滤波器参照贵广三调谐滤波器[22], 线路两侧平波电抗器电感为 300 mH。分别设置图 1 中所示的 F_1 — F_5 这 5 种故障, 仿真在不同故障位置、过渡电阻条件下的区内和区外故障。

4.2 典型故障仿真及阈值整定

分别对区内线路末端 (1 500 km) 高阻 (500 Ω) 接地故障、整流侧区外金属性接地故障 F_2 及逆变侧区外金属性接地故障 F_3 进行仿真, 分流器 2 测得的电流 i_2 如图 11 所示。

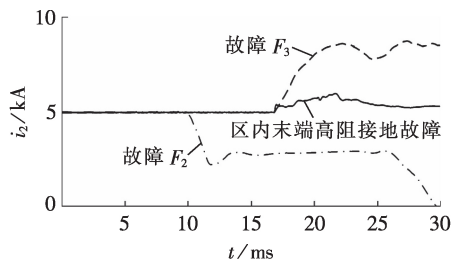


图 11 不同故障下 i_2 的波形

Fig.11 Waveforms of i_2 under different faults

由图 11 可以看出, 区外金属性接地故障发生后, 测点电流的幅值远大于区内高阻接地故障发生时的测点电流, 即区内故障电流特征在过渡电阻较大时不如区外故障电流特征明显, 这会对传统行波保护的整定造成较大的影响。

当发生以上 3 种故障时, 本文所提方案保护判据的计算值如图 12 所示。图中 M_{c3} 为三调谐滤波器下保护判据的计算值。由图可知, 在三调谐滤波器下, 发生区内末端高阻接地故障时保护判据计算值的最大值为 10.35, 远大于发生区外金属性故障时保护判据计算值的最大值。可见, 本文所提保护判据能够有效地区分线路末端高阻故障与区外金属性故障, 具有较高的可靠性。

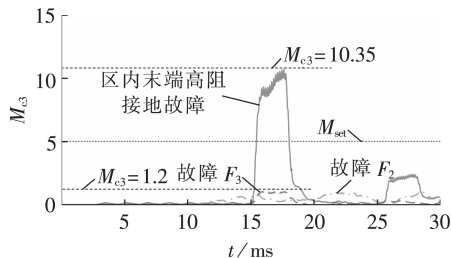


图 12 所提方案保护计算结果 (三调谐滤波器)

Fig.12 Protection calculative results of proposed scheme (triple-tuned filter)

当区内线路发生故障时, 随着故障距离和过渡电阻的减小, 保护判据的计算值会进一步地增大; 同时, 为了保证保护同时具备良好的可靠性与灵敏性, 本文将三调谐滤波器下保护的整定值设置为 $M_{set3}=5$ 。

4.3 适应性分析

为了验证本文所提保护方案在不同故障位置时的适应性, 对分别发生 F_1 — F_5 这 5 种故障时的保护判据进行验证, 部分仿真结果如表 1 所示。表 1 中, 区内故障 F_1 的过渡电阻为 500 Ω ; 区外故障均设置为金属性短路故障; 故障距离为距整流侧的距离, 后同。

表 1 不同故障下的仿真结果

Table 1 Simulative results under different faults

故障	故障距离 / km	M_{c3}	故障判别	保护动作情况
F_1	1	18.8	区内	√
	500	15.3	区内	√
	1000	13.5	区内	√
	1500	10.4	区内	√
F_2	—	1.1	区外	×
F_3	—	1.2	区外	×
F_4	—	0.9	区外	×
F_5	—	0.8	区外	×

注: “√”表示保护动作, “×”表示保护不动作, 后同。

由表 1 可知, 当区内线路的不同位置发生故障时, 保护判据的计算值均大于保护整定值, 保护能可

靠动作;而当区外任意位置发生故障时,保护均能可靠不动作。

表2给出区内线路1/3处(距离整流侧500 km)和线路末端(距离整流侧1 500 km)发生不同过渡电阻故障时的仿真结果。由表2可以知道,当区内线路发生故障时,保护判据计算值 M_c 虽然随着过渡电阻的增大而减小,但是即使在500 Ω 高阻接地故障情况下, M_c 仍大于保护整定值,保护可靠动作。

表2 不同过渡电阻下的仿真结果

Table 2 Simulative results under different transition resistances

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	M_{c3}	故障判别	保护动作情况
500	10	65	区内	√
	50	50	区内	√
	100	41	区内	√
	300	22	区内	√
	500	15	区内	√
1 500	10	53	区内	√
	50	42	区内	√
	100	32	区内	√
	300	16	区内	√
	500	10	区内	√

为了验证本文所提保护方案的抗噪性,在测点电流信号中分别加入信噪比为50 dB及40 dB的高斯白噪声。当区内线路发生过渡电阻为500 Ω 的故障及区外发生金属性短路故障时,部分仿真结果如表3所示。由表3可知,在50 dB及40 dB的噪声干扰下,本文所提保护方案均能够准确识别区内、外故障,表明所提方案具有较强的抗噪能力。

表3 不同噪声情况下的仿真结果

Table 3 Simulative results under different noise

信噪比/dB	故障	M_{c3}	故障判别	保护动作情况
50	F_1 (500 km)	13.2	区内	√
	F_1 (1 500 km)	9.9	区内	√
	F_2	0.8	区外	×
	F_3	1.5	区外	×
	F_4	0.9	区外	×
	F_5	1.3	区外	×
40	F_1 (500 km)	8.5	区内	√
	F_1 (1 500 km)	6.4	区内	√
	F_2	2.8	区外	×
	F_3	3.1	区外	×
	F_4	1.9	区外	×
	F_5	3.9	区外	×

为了验证本文所提保护方案对滤波器种类的适应性,参照文献[24]中的双调谐滤波器并采用本文所提保护方案,对40 dB噪声情况下区内发生过渡电阻为500 Ω 接地故障及区外发生金属性短路故障时的保护动作情况进行验证,部分仿真结果如表4所示。表中, M_{c2} 为双调谐滤波器下保护判据的计算

值,设置保护动作整定值 $M_{set2}=15$ 。由表4可知,当采用双调谐直流滤波器时,本文所提方案仍能够准确识别区内、外故障,表明该方案不受滤波器种类的影响,具有较广泛的应用范围。

表4 双调谐滤波器下的仿真结果

Table 4 Simulative results under double-tuned filter

故障	故障距离/km	M_{c2}	故障判别	保护动作情况
F_1	1	28.5	区内	√
	500	21.1	区内	√
	1 000	19.8	区内	√
	1 500	18.8	区内	√
F_2	—	-1.6	区外	×
F_3	—	4.2	区外	×
F_4	—	3.2	区外	×
F_5	—	3.6	区外	×

5 结论

本文基于高压直流输电系统的等效电路,分析了故障电流在系统中的传播特性,进而根据不同位置发生故障时整流站线路边界两侧故障电流特征的差异,提出了一种高压直流输电线路单端保护方案,所得结论如下。

(1)当发生区内故障和区外故障时,故障电流在输电系统中经历不同的传播过程,从而使线路边界两侧测点具有不同的频率特征。利用线路边界两侧测点在直流滤波器最高调谐频率以上频段的特征差异,可对区内故障和区外故障进行识别。

(2)本文所提保护方案能够有效识别区内、外故障,并且不受故障位置、过渡电阻以及滤波器种类的影响,抗噪声干扰能力强,具有一定的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34):6007-6020.
- [2] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1760-1771.
- [3] KONG F, HAO Z G, ZHANG B H. A novel traveling-wave-based main protection scheme for ± 800 kV UHVDC bipolar transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):2159-2168.
- [4] 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.
- [5] 周全,武霁阳,李海峰. 高压直流线路区内外故障判别新方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):123-128, 148.
ZHOU Quan, WU Jiyang, LI Haifeng. In-/out-zone fault iden-

- tification for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 123-128, 148.
- [6] 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.
- [7] ZHANG Y K, LI Y L, SONG J Z, et al. A new protection scheme for HVDC transmission lines based on the specific frequency current of DC filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 420-429.
- [8] 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): 151-161.
- 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): 151-161.
- [9] 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.
- [10] 邢鲁华, 陈青, 付兆远, 等. 基于电压和电流突变量的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 61-66.
- XING Luhua, CHEN Qing, FU Zhaoyuan, et al. Protection principle for HVDC transmission lines based on fault component of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 61-66.
- [11] 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, 35(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, 35(22): 5757-5767.
- [12] 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.
- [13] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [14] DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling wave protection algorithm based on full waveform in the time and frequency domains[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(15): 3680-3691.
- [15] 陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红, 等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 67-72.
- CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72.
- [16] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.
- ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [17] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 800 kV特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
- SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [18] SONG G B, CHU X, GAO S P, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 599-607.
- [19] 程佩芬, 李崇涛, 傅闯, 等. 基于状态空间法的高压直流输电系统电磁暂态简化模型的解析算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1230-1239.
- CHENG Peifen, LI Chongtao, FU Chuang, et al. An analytic solution for simplified electromagnetic transient model of HVDC transmission system based on state space method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1230-1239.
- [20] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西, 等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 184-191.
- DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.
- [21] 汤兰西, 董新洲. MMC直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- [22] 宋蕾, 文俊, 闫金春, 等. 高压直流输电系统直流滤波器设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 647-651, 677.
- SONG Lei, WEN Jun, YAN Jinchun, et al. Design of DC filters in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 647-651, 677.
- [23] 林圣, 牟大林, 刘磊, 等. 基于特征谐波阻抗比值的HVDC直流滤波器高压电容器接地故障保护方案[J/OL]. 中国电机工程学报. (2019-04-22)[2019-04-29]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.182432>.
- [24] 陈仕龙, 束洪春, 万春红, 等. 一种特高压直流输电线路单端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 26-31.
- CHEN Shilong, SHU Hongchun, WAN Chunhong, et al. The principle of single-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 26-31.

作者简介:



戴文睿

戴文睿(1996—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电线路保护(E-mail: dwr.swjtu@foxmail.com);

张海强(1994—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为HVDC换流站保护与故障定位(E-mail: zhq.swjtu@foxmail.com);

林圣(1983—),男,湖南宁乡人,副教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为供电系统保护与故障定位、故障预测与管理、地铁杂散电流分析与抑制等(E-mail: slin@swjtu.edu.cn)。

(下转第87页 continued on page 87)

Single-terminal line protection for UHVDC power transmission based on voltage backward traveling wave

DAI Zhihui^{1,2}, LIU Ningning¹, LIU Yuan¹, LU Hao¹, CAO Hong²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation,
China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the shortages of traditional current differential protections for UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current) transmission lines, such as poor tripping speed and limited adaptability to high-resistance faults, a single-terminal line protection based on voltage backward traveling wave is proposed. Considering the attenuation impacts of both line boundary and UHVDC lines on high-frequency voltage traveling wave, the transmission characteristics of traveling wave with respect to internal and external faults on UHVDC lines are performed. It shows that the high-frequency voltage backward traveling wave at the rectifier side is relatively large in the case of internal faults. However, the backward traveling wave is approximately to be 0 in the case of external faults. Thus, it can be utilized to discriminate internal faults from external ones. The improved voltage gradient method is used to realize the quick and reliable pickup criterion. Numerous simulative results show that the proposed protection scheme can identify the internal and external faults quickly without communication, and can protect the entire line reliably. Besides, it can identify high-impedance faults and is not subject to the distributed capacitor of DC lines.

Key words: UHVDC power transmission; single-terminal protection; line protection; voltage backward traveling wave; line boundary; high-impedance grounding fault

(上接第73页 continued from page 73)

Single-end protection scheme for HVDC transmission line based on fault current propagation characteristics

DAI Wenrui, ZHANG Haiqiang, MOU Dalin, LIU Lei, LIN Sheng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Aiming at the problems of low fault identification accuracy and poor transition resistance tolerance of existing traveling wave protections for HVDC (High Voltage Direct Current) transmission lines, a single-end protection scheme based on fault current propagation characteristics is proposed. Based on the equivalent circuit of HVDC transmission system, the propagation characteristics of fault current from the commutation side to the line, from the line to the commutation side and in the line are analyzed respectively, and then the differences of fault current characteristics on both sides of the line boundary of the rectifier station are analyzed when fault occurs at different locations. Based on this, the identification criterion of internal and external faults is constructed by using characteristic frequency band current, and the single-end protection scheme of DC line is designed. Simulative results based on PSCAD/EMTDC indicate that the proposed protection scheme can accurately identify internal and external faults, and has good resistance to transition resistance and anti-noise-interference ability.

Key words: HVDC power transmission; transmission lines; single-end protection; equivalent circuit; current propagation characteristics; line boundary measuring point current