



中国电机工程学报
Proceedings of the CSEE
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法
作者: 张晨浩, 宋国兵, 董新洲
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190319
网络首发日期: 2019-07-30
引用格式: 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法. 中国电机工程学报. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.190319>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法

张晨浩¹, 宋国兵¹, 董新洲²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;)

(2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;)

A Non-unit Adaptive Traveling Wave Protection Method for High Impedance Faults

ZHANG Chenhao¹, SONG Guobing¹, DONG Xinzhou²

(1. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;)

(2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;)

ABSTRACT: The traditional derivative-based traveling wave protection method has the problem of operation failure when high impedance faults occur. Based on the analysis of the influence factors of the fault traveling wave, this paper draws the conclusion that the distortion of fault traveling wave is related to the fault distance, the amplitude of fault traveling wave is related to fault impedance. A basic fitting function is proposed to fit the zero-mode fault current, and the parameters reflecting fault distance and impedance are obtained. Using the parameters can extract fault information to obtain the fault impedance estimation interval, and the adaptive non-unit traveling wave protection method is realized. The simulation results show that the proposed method can fast and effectively protect the dc transmission line, even with high fault impedance. Comparing with the traditional traveling wave protection and transient-based protection, the proposed method has higher sensitivity and can protect wider area of the dc transmission lines.

KEY WORDS: current fitting; fault information extraction; estimation interval; non-unit traveling wave protection; adaptive

摘要: 传统的基于电气量导数的行波保护方法存在输电线路发生高阻故障时的拒动问题。该文在故障行波影响因素分析的基础上, 得到故障行波畸变程度和故障距离有关, 故障行波幅值和过渡电阻有关的结论。并构造标准拟合函数对故障零模电流进行拟合, 得到分别反映故障距离和过渡电阻的参数。利用该参数进行故障信息提取, 得到过渡电阻预估区间, 实现自适应的单端行波保护方法。仿真验

证表明, 所提出的保护方法能快速有效的保护直流输电线路, 具有很高的耐过渡电阻能力。与传统的行波保护和直流暂态量保护方法相比, 该方法具有更高的灵敏度和更大的直流输电线路保护范围。

关键词: 电流拟合; 故障信息提取; 预估区间; 单端行波保护; 自适应

1 引言

随着电力电子技术的不断发展, 基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电技术克服了传统基于晶闸管换流器的高压直流输电的诸多不足, 在电能质量、功率控制、供电可靠性等方面具有明显优势^[1-4]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的应用克服了两电平或三电平 VSC 存在的高损耗、动态均压和波形质量问题, 同时也为高电压等级、大容量的柔性直流电网的发展奠定了基础^[2,5,6]。目前, 国家电网公司正在张北地区建设双极结构的 MMC 型±500 kV 高压柔性直流电网示范工程。

与传统高压直流输电系统相比, 柔性直流输电系统阻尼小, 惯性低, 直流线路发生故障后电流迅速上升, 故障发展过程快^[7,8]。柔性直流输电系统要求保护系统必须在短时间内(几毫秒)快速响应^[9]。工程实际中表明故障后 3 ms 内最多出现一个换流站闭锁(2.2 ms), 7 ms 时可能会出现两个换流站闭锁, 按照直流双极短路故障保护动作过程中, 最多出现一个换流站闭锁的要求, 考虑一定的裕度, 则直流断路器必须在 6 ms 内开断故障电流, 考虑断路器动作时间为 3 ms, 则直流保护动作时间不能超过 3 ms^[10]。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900603); 国家电网公司科技项目(52094017000W);

The National Key Research and Development Plan of China (2016YFB0900603); Technology Projects of State Grid Corporation of China(52094017000W);

两端直流输电系统可利用线路两端的平波电抗器、直流滤波器等边界元件实现单端全线速动保护。柔性直流电网主要采用 MMC 型换流站,不存在直流滤波器和并联大电容^[7,11]。而实际工程中,通过在直流线路两端加装限流电抗器以限制故障电流的上升速度,为保护判别和直流断路器开断争取时间^[11,12]。因此,直流线路两端的边界元件为快速动作的边界保护在两端直流输电系统和柔性直流电网中的应用提供了基础。目前两端柔性直流输电系统的保护借鉴传统高压直流输电系统保护,主保护采用行波保护和微分欠压保护^[13,14],其中行波保护主要采用 ABB 和 SIEMENS 两家公司的单端量行波保护原理,动作时间在几个毫秒,满足速动性要求。但是这两种保护原理的本质是利用电气量的突变量构造保护,没有充分利用故障行波的全频带信息,因此存在高过渡电阻故障时保护灵敏度低的问题^[14-17]。

针对直流线路行波保护存在的灵敏度不足问题,文献[18-21]对直流线路暂态量保护原理进行了研究。文献[18]基于传统直流线路边界对故障高频电压信号的阻隔特性,利用高频电压能量值区分区内、外故障,并开发出直流输电线路单端暂态量保护装置。测试结果表明,暂态量保护原理耐过渡电阻能力在 $50\ \Omega \sim 150\ \Omega$,相较现有行波保护的灵敏度有所提升。文献[19-21]分别利用极波高低频能量比、暂态电压故障分量谱能量和信息熵测度构造暂态量保护,提高了暂态量保护的可靠性和耐过渡电阻能力。这些方法本质上利用传统直流平波电抗器和直流滤波器构成的边界元件对低频信号衰减作用不明显这一特点,通过引入低频能量作为计算参考以消除过渡电阻对暂态能量计算结果的影响。但这类方法在低频、高频能量计算时频带的选取十分依赖线路边界元件的结构和参数,其在柔性直流系统中的适用性尚需讨论。

直流线路发生故障后,故障点产生的行波是一个近似阶跃波^[22]。考虑到输电线路的频变参数特性,该阶跃波在直流输电线路上传播的过程中逐渐变为畸变阶跃波。本文分析了直流线路首端畸变阶跃波的影响因素,得出了畸变阶跃波同故障距离和过渡电阻的关系。并根据畸变阶跃波的形式构造了标准拟合函数,给出了标准拟合函数

的参数和故障距离、过渡电阻的对应关系。故障发生后,通过对线路首端的故障首行波进行拟合得到反映故障距离和过渡电阻信息的参数,并结合故障数据集给出故障过渡电阻的估计区间。利用得出的故障过渡电阻估计区间实现自适应的行波保护原理。本方法能有效提高现有行波保护方法的灵敏度,其本质上利用了直流输电线路的频变参数特性,因而本方法对于直流线路的保护具有共性,可以推广到其它直流拓扑结构。

2 故障首行波影响因素分析

以两端柔性直流输电系统为例研究故障首行波的特征,拓扑结构如图 1 所示。其中直流输电线路为双极架空线路, L_{dc} 为限流电抗器 R_1 、 R_2 为线路两端保护安装处, M、N 为直流母线, f_1 为直流线路故障, f_2 为限流电抗器和换流器之间故障,是区外故障。

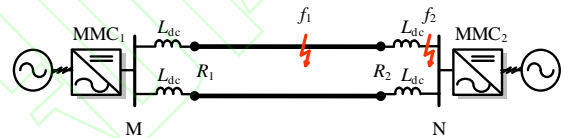


图 1 两端柔性直流输电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of point-to-point MMC HVDC grid

采用极模变换消除线路极间的耦合作用,得到零模和一模分量:

$$\begin{bmatrix} A_{p0} \\ A_{p1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ A_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, A_p 、 A_n 分别是正极电气量和负极电气量; A_{p0} 、 A_{p1} 分别是以正极为基准的零模和一模分量。

2.1 故障距离

当直流输电线路距线路首端 x 处发生故障时,线路首端电压 $U_i(0,s)$ 、电流 $I_i(0,s)$ 和故障点处电压 $U_i(x,s)$ 、电流 $I_i(x,s)$ 之间的关系为^[23]:

$$\begin{bmatrix} U_i(0,s) \\ I_i(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i(s)x) & -Z_{ci} \sinh(\gamma_i(s)x) \\ -\sinh(\gamma_i(s)x)/Z_{ci} & \cosh(\gamma_i(s)x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i(x,s) \\ I_i(x,s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 i 可以取 0 或 1, 分别表示零模和一模分量; Z_{ci} 为直流线路波阻抗; $\gamma_i(s)$ 为直流线路传播系数。由式(2)可以得到故障电流首行波表达式:

$$I_i(0,s) = e^{-\gamma_i(s)x} I_i(x,s) \quad (3)$$

式(3)描述了频域下故障电流行波的传输特性。考虑输电线路的频变参数特性,任意频率 ω 下的行波波速度可以表示为:

$$v_i = \omega / \beta_i(\omega) \quad (4)$$

其中:

$$\beta_i(\omega) = \text{Im}[\gamma_i(s)] = [\omega^2 l_i(\omega) c_i(\omega) - r_i(\omega) g_i(\omega) + \sqrt{(r_i^2(\omega) + \omega^2 l_i^2(\omega))(g_i^2(\omega) + \omega^2 c_i^2(\omega))}]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (5)$$

其中 $g_i(\omega)$ 、 $c_i(\omega)$ 、 $l_i(\omega)$ 和 $r_i(\omega)$ 分别为单位长度的电导、电容、电感和电阻。可以看出, 行波的波速度是频变的, 这意味着故障行波的不同频率分量在输电线路上传播的过程中将具有不同的波速度。行波波速度的频变特性如图 2 所示

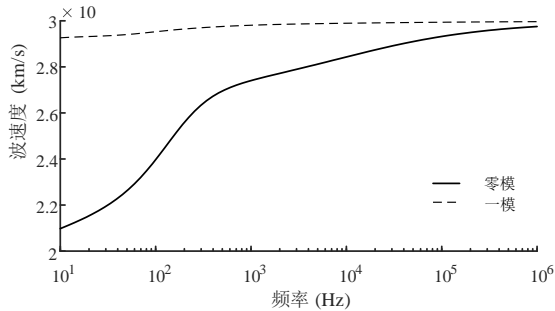


图 2 波速度的频变特性

Fig. 2 Frequency-dependent characteristic of the wave velocity

因此, 直流输电线路故障发生区内故障 f_1 后, 故障点处产生行波的高频分量较低频分量更快的传播到输电线路的首端 R_1 。由图 2 可以看出, 故障行波的零模分量在不同频率下的波速度差异十分显著。

故障点处产生的行波是一个近似的阶跃波。在这个近似阶跃波向线路首端 R_1 传播的过程中, 不同频率分量之间的相对距离随着传播距离的增加变大, 这就造成阶跃波不断发生畸变。线路首端保护安装处 R_1 测量到的电流行波实际上是式(3)得到的不同频率电流分量的叠加, R_1 将首先接收到故障行波的高频分量, 一段时间后才接受到低频分量。因此, R_1 处测得的故障行波在初始阶段迅速增长, 这是因为故障点处产生行波的不同频率分量相继到达线路首端, 然后随着所有频率分量的完全到达, 其增长速度减慢并停止, 最后, 故障点产生的行波由近似阶跃波变为了畸变阶跃波, 如图 3 所示。

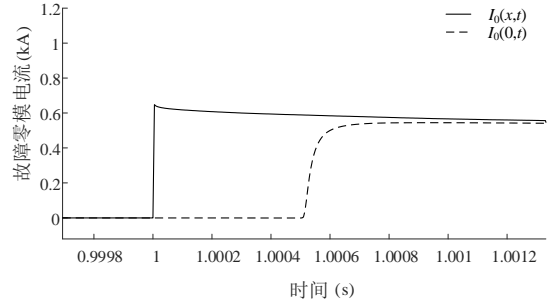


图 3 故障点产生行波和线路首端行波对比

Fig. 3 Comparison of $I_0(x,t)$ and $I_0(0,t)$

故障距离越远, 故障点产生的行波在输电线路上的传播过程中, 其高频、低频分量之间的相对距离越大, 同时高频、低频分量之间到达线路首端 R_1 的时间间隔越长。这导致 R_1 处测得的故障行波由上升到稳定的过程变长, 即故障行波的畸变程度增大。图 4 给出了不同故障距离下故障零模电流的波形。因此, 线路首端 R_1 处的故障行波中包含了故障距离信息。零模波速度的频变特性较显著, 因此故障行波零模分量的畸变较明显, 后续研究将重点针对故障行波的零模分量进行讨论。

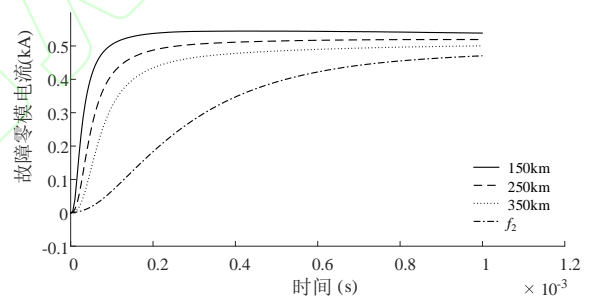


图 4 不同故障距离下故障零模电流的波形

Fig. 4 Zero-mode fault currents of different fault distances

发生区外故障 f_2 时, 利用 Peterson 等效电路可以得出 R_2 处故障电流零模分量表达式:

$$i'_{Nf0}(t) = \frac{u_{f0}}{Z_{c0}} (1 - e^{-(Z_{c0}/L_{dc})t}) \varepsilon(t) \quad (6)$$

之后 R_2 处的故障电流行波将继续沿着直流线路传播到线路首端测量点 R_1 , 这意味着它将受到直流线路全长和限流电抗器的畸变作用, 这说明区外故障时, 故障点产生的行波较发生区内故障时具有更加严重的畸变程度, 如图 4 所示。

2.2 过渡电阻

当直流线路发生非金属性故障时, 故障点处产生的故障行波的零模分量幅值可以表示为:

$$\begin{cases} u_{f0} = \frac{-\sqrt{2}U_f Z_{c0}}{Z_{c0} + Z_{c1} + 4R_f} \\ i_{f0} = \frac{-\sqrt{2}U_f}{Z_{c0} + Z_{c1} + 4R_f} \end{cases} \quad (7)$$

其中, R_f 是过渡电阻; U_f 是正常工作时的直流电压。式(7)说明故障点处产生的行波幅值和过渡电阻呈负相关。过渡电阻越大, 故障行波幅值越小, 但过渡电阻的存在并不影响故障点处行波的阶跃特性, 如图 5 所示。因此, 过渡电阻的存在对线路首端 R_1 处的故障行波畸变程度没有影响。

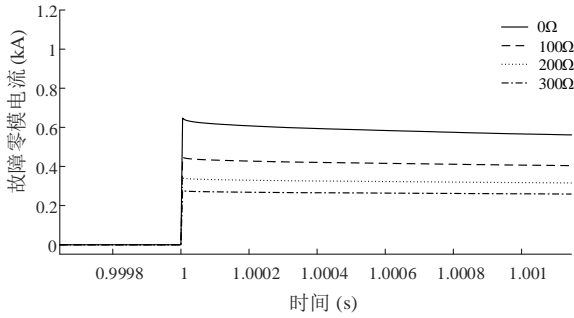


图 5 不同过渡电阻故障时故障点处零模电流

Fig. 5 Zero-mode fault currents at the fault point of different fault impedances

3 单端自适应行波保护原理

利用矢量匹配法对式(3)中的传播函数 $\exp(-\gamma_0(s)x)$ 进行拟合, 并假定 $I_0(x,t)=i_{f0}\varepsilon(t)$, 线路首端故障零模电流的初始行波可以表示为:

$$I_0(0,s) = \frac{i_{f0}}{s} \left(\sum_{n=1}^{N_f} \frac{w_n}{s - v_n} + d + s \cdot h \right) \cdot e^{-\tau s} \quad (8)$$

其中 N_f 是拟合阶数, τ 是时延, w_n 、 v_n 、 d 和 h 是拟合系数, 对于直流输电线路来说, $h \approx 0$ 。此时对式(8)两边同时进行反拉普拉斯变换, 可以得到线路首端故障零模电流的时域近似表达式:

$$I_0(0,t) = i_{f0} \left[\sum_{n=1}^{N_f} \frac{w_n}{v_n} (e^{v_n(t-\tau)} - 1) + d \right] \varepsilon(t-\tau) \quad (9)$$

式(6)和(9)说明: 1) 对于 R_1 的正向故障而言, 线路首端测得的故障零模电流行波具有以自然对数为底数的指数函数相加的形式; 2) 结合式(7)可以看出, 过渡电阻的存在仅影响上述指数函数中 i_{f0} 的大小, 并不影响指数函数相加和的形式和其指数系数 v_n 。

3.1 标准拟合函数选择

鉴于直流线路故障后, 故障零模电流的形式, 本文提出了标准拟合函数来对故障零模电流进行拟合, 标准拟合函数形式如下:

$$p_N(t) = \sum_{n=1}^N -a_n e^{-b_n t} + c \quad (10)$$

其中 a_n 、 b_n 和 c 是函数参数; N 是函数阶数。具体计算表明函数阶数的增大对于拟合结果的优度提升很小, 却带来计算量的极大提高。因此, 选取 $p_1(t)$ 作为最终的标准拟合函数。

对于选取的标准拟合函数, 参数 b_1 决定了拟合函数的陡度, b_1 越大, 函数陡度越大, 而 a_1 决定了函数的幅值。对于故障零模电流, 故障距离越大, 电流相对于故障点的阶跃波畸变程度越大, 过渡电阻越大, 故障零模电流的幅值越小。因此, 认为故障零模电流经拟合后得到的参数 b_1 表示了其畸变程度, a_1 表示了其幅值。

直流线路发生故障后, 利用标准拟合函数对线路首端测得的故障零模电流进行拟合, 得到参数 a_1 、 b_1 和 c 。根据前述分析, a_1 反映了故障零模电流的幅值, 故障过渡电阻越大, a_1 越小。 b_1 反映了故障零模电流的畸变程度, 故障距离越远, b_1 越小。

3.2 过渡电阻信息提取

将直流线路分段, 形成包含不同故障距离和过渡电阻故障的故障数据集。对于一条直流线路, 选取 L_1, L_2, \dots, L_n 共 n 种故障距离 ($L_1 < L_2 < \dots < L_n < L$) 和 $R_{f,1} < R_{f,2} < \dots < R_{f,m}$ 共 m 种过渡电阻 ($0 = R_{f,1} < R_{f,2} < \dots < R_{f,m}$) 作为样本形成故障数据集 $S(i, j)$, 其样本容量为 $m \times n$ 。故障数据集中任意一个元素可表示为 (b_{ij}, a_{ij}) , 其中 b_{ij} 、 a_{ij} 分别为 j 故障距离、 i 过渡电阻条件下故障时故障零模电流的拟合系数。

实际发生故障时, 判断故障零模电流拟合出的 (b_f, a_f) 在故障数据集的位置实现故障过渡电阻信息的提取。具体实现方式为: 首先判断 (b_f, a_f) 是否属于故障数据集, 对于属于故障数据集的 (b_f, a_f) , 直接给出故障距离和过渡电阻值。若不属于, 则遍历故障数据集 $S(i, j)$, 判断 (b_f, a_f) 是否在数据集中以相邻的四个点 $S(i, j)$ 、 $S(i, j+1)$ 、 $S(i+1, j+1)$ 、 $S(i+1, j)$ 为端点组成的四边形中 ($i \leq m-1$, $j \leq n-1$)。定义:

$$s(i, j) = \frac{1}{2} \left(\begin{vmatrix} b_{i,j} & a_{i,j} \\ b_{i,j+1} & a_{i,j+1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{i+1,j} & a_{i+1,j} \\ b_{i+1,j+1} & a_{i+1,j+1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{i+1,j+1} & a_{i+1,j+1} \\ b_{i+1,j} & a_{i+1,j} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{i,j} & a_{i,j} \\ b_{i+1,j} & a_{i+1,j} \end{vmatrix} \right) \quad (11)$$

$$s_1(i, j) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} b_{i,j} & a_{i,j} & 1 \\ b_{i,j+1} & a_{i,j+1} & 1 \\ b_f & a_f & 1 \end{vmatrix} \quad (12)$$

$$s_2(i, j) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} b_{i,j+1} & a_{i,j+1} & 1 \\ b_{i+1,j+1} & a_{i+1,j+1} & 1 \\ b_f & a_f & 1 \end{vmatrix} \quad (13)$$

$$s_3(i, j) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} b_{i+1,j+1} & a_{i+1,j+1} & 1 \\ b_{i+1,j} & a_{i+1,j} & 1 \\ b_f & a_f & 1 \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$s_4(i, j) = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} b_{i+1,j} & a_{i+1,j} & 1 \\ b_{i,j} & a_{i,j} & 1 \\ b_f & a_f & 1 \end{vmatrix} \quad (15)$$

$$s_{sum}(i, j) = |s_1(i, j)| + |s_2(i, j)| + |s_3(i, j)| + |s_4(i, j)| \quad (16)$$

当存在一个 (i, j) 使得:

$$|s(i, j)| = s_{sum}(i, j) \quad (17)$$

则判定故障距离在 $(L_j, L_{j+1}]$ 之间, 过渡电阻在 $(R_{f,i}, R_{f,i+1}]$ 之间。

3.3 自适应整定值选取

对于判定过渡电阻在 $(R_{f,i}, R_{f,i+1}]$ 之间的故障, 保护判据为:

$$\max\left(\frac{di}{dt}\right) > \Delta_{1,R_{f,i+1}} = k_{rel} \max\left[\left(\frac{di}{dt}\right)_{R_{f,i+1}}\right] \quad (18)$$

其中 $\max[(di/dt)_{R_{f,i+1}}]$ 是区外出口处发生过渡电阻为 $R_{f,i+1}$ 的故障时线路首端测得的极电流导数最大值; $\Delta_{1,R_{f,i+1}}$ 是线路发生过渡电阻为 $R_{f,i+1}$ 故障时保护的整定值, k_{rel} 为可靠系数, 本文取 1.2。若不存在满足式(17)的 (i, j) , 则式(18)中保护整定值按躲过区外出口处发生金属性故障设置为 $\Delta_{1,0}$ 。

上述原理均针对直流线路单极接地故障。这是考虑到实际中高过渡电阻一般出现在单极接地故障中, 双极故障没有保护的灵敏度问题。当发生双极故障而没有故障零模电流时, 式(18)中保护整定值也按躲过区外出口处发生金属性故障设置为 $\Delta_{1,0}$ 。

3.4 反射波影响消除

利用标准拟合函数对线路首端测得的故障零模电流进行拟合时, 电流采样数据窗长度为 T_n 。

假设线路全长为 L , 行波速度为光速 v_c , 当发生直流线路近端 ($x < v_c T_n/2$) 或近对端 ($x > L - v_c T_n/2$) 故障时, 在故障首行波到达线路首端后的 T_n 时间内, 由故障点或线路对端边界反射来的反射波将到达线路首端。反射波的叠加将影响到故障零模电流的拟合结果。

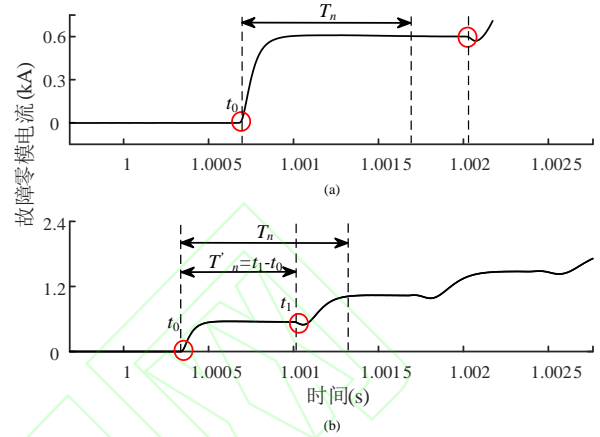


图 6 行波到达时刻标定

Fig. 6 Calibration of the arrival time of the traveling wave

利用小波变换模极大值法对故障零模电流行波到达时刻进行标定。如图 6 所示, 直流线路故障发生后, 标定故障首行波到达线路首端的时刻为 t_0 。对故障首行波到达后 T_n 时间长度内数据进行采样并进行奇异值检测。若在 T_n 时间未检测到反射波的叠加, 则利用标准拟合函数对 T_n 时间长度内的故障零模电流进行拟合, 如图 6 (a)所示; 若在 T_n 时间检测到反射波的叠加, 标定反射波到达时刻为 t_1 , 令 $T'_n = t_1 - t_0$, 如图 6 (b)所示。此时直接判定直流线路近端或近对端发生了故障。

4 仿真验证

在 PSCAD 中搭建如图 1 所示的 ± 400 kV MMC 柔性直流输电系统验证所提出的保护方法。其中, 直流架空线路的频变参数模型及杆塔模型如图 7 所示, MMC 柔性直流输电系统的参数如表 1 所示。线路两端加装 200 mH 的限流电抗器, 采样频率为 50 kHz。以线路 R_1 处的保护为研究对象, 所有故障均设置为正极接地故障。

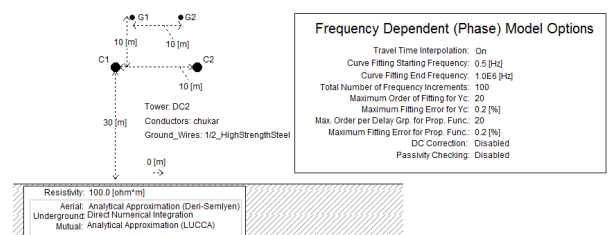


图 7 直流架空线路的频变参数模型及杆塔模型

Fig. 7 Frequency-dependent overhead line model and tower model

表 1 MMC 柔性直流输电系统参数

Table 1 Parameters of MMC HVDC system

参数	数值
MMC 额定容量	800MVA
交流系统电压	380kV
联结变压器额定电压	380kV/220kV
绕组联结组别标号	D/Yn
联结变压器短路阻抗	18%
桥臂子模块数	250
桥臂电抗值	29mH
子模块电容值	5mF
子模块投切周期	100μs
线路长度	500km

4.1 故障零模电流拟合结果

图 8 以 200 km 发生金属性故障为例, 给出了故障零模电流行波的拟合结果图。可以看出, 采用标准函数对零模电流进行拟合具有很高的精度, 得到的拟合系数能够反映故障零模电流行波包含的故障距离及过渡电阻信息。

本文仿真验证中, 所有故障情况下零模电流拟合结果的拟合优度均满足: $RMSE \leq 0.014$, $Rsquare \geq 0.995$ 。表 2-表 5 分别给出了线路不同故障情况下零模电流的拟合结果。

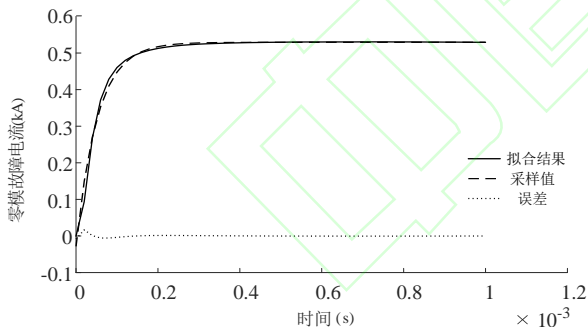


图 8 故障零模电流拟合结果

Fig. 8 Fitting result of zero-mode current traveling wave

表 2 线路不同距离故障拟合结果(0 Ω 过渡电阻)

Table 2 Fitting results of faults of different distances (0 Ω fault impedance)

故障距离(km)	a_1	b_1	c
150	0.558 1	26 085.15	0.542 6
200	0.557 6	19 236.94	0.529 3
250	0.554 7	15 170.71	0.516 7
300	0.549 9	12 426.96	0.504 7
350	0.544 2	10 437.43	0.493 7

表 3 线路不同距离故障拟合结果(100 Ω 过渡电阻)

Table 3 Fitting results of faults of different distances (100 Ω fault impedance)

故障距离(km)	a_1	b_1	c
150	0.394 8	24 642.58	0.385 3
200	0.394 3	18 236.86	0.376 1
250	0.392 1	14 428.13	0.367 2
300	0.388 8	11 856.60	0.358 9
350	0.384 9	9 968.32	0.351 3

表 4 线路不同距离故障拟合结果(200 Ω 过渡电阻)

Table 4 Fitting results of faults of different distances (200 Ω fault impedance)

故障距离(km)	a_1	b_1	c
150	0.305 3	23 864.02	0.298 6
200	0.304 9	17 694.73	0.291 6
250	0.303 2	14 028.05	0.284 8
300	0.300 7	11 552.81	0.278 4
350	0.297 7	9 712.45	0.272 6

表 5 线路不同距离故障拟合结果(300 Ω 过渡电阻)

Table 5 Fitting results of faults of different distances (300 Ω fault impedance)

故障距离(km)	a_1	b_1	c
150	0.248 9	23 373.57	0.243 7
200	0.248 5	17 351.90	0.238 0
250	0.247 1	13 776.95	0.232 5
300	0.245 2	11 364.73	0.227 4
350	0.242 7	9 548.92	0.222 7

可以看出, 过渡电阻一定时, 故障距离越远, b_1 越小; 过渡电阻的增大使得 a_1 显著减小, 与前文分析结论一致。故障距离也会对 a_1 有一些影响, 这是由于行波在上传播存在衰减造成的, 但其影响较过渡电阻而言很小。

4.2 故障数据集的形成

对于本文仿真验证模型, 取 150 km、200 km、250 km、300 km、350 km 五种故障距离, 0 Ω、100 Ω、200 Ω、300 Ω 四种过渡电阻作为样本形成故障数据集 $S(i, j)$, $i \leq 4$, $j \leq 5$ 。将故障数据集中的元素 (b_{ij}, a_{ij}) 绘制在平面坐标系上, 得到图 9 所示的故障数据集平面。

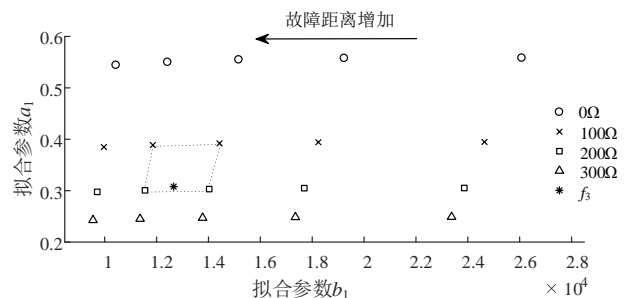


图 9 故障数据集平面

Fig. 9 The plane of fault dataset

4.3 自适应整定值的设置

利用直流输电线路 f_2 处发生过渡电阻分别为 0 Ω 、100 Ω 、200 Ω 和 300 Ω 的单极故障时线路首端保护测得的极电流导数最大值，得到所提出的保护方法在不同过渡电阻下的整定值，如表 6 所示。

表 6 保护整定值

Table 6 Threshold value of protection

过渡电阻(Ω)	$\Delta_{1,R}(\text{p.u./0.15ms})$
0	0.425 4
100	0.298 7
200	0.230 1
300	0.187 2

4.4 保护计算结果

当直流输电线路距首端 275 km 发生 190 Ω 过渡电阻故障 f_3 时，故障零模电流的拟合结果为： $a_1=0.301\ 9$ ， $b_1=12\ 660.67$ 。在故障数据集中计算 (12 660.67, 0.301 9) 的位置，计算结果为：

$$|s| = \begin{pmatrix} 1081.57 & 639.39 & 427.28 & 308.12 \\ 562.12 & 332.30 & 222.30 & 162.44 \\ 343.62 & 203.21 & 135.88 & 100.52 \end{pmatrix},$$

$$s_{sum} = \begin{pmatrix} 2\ 488.86 & 1\ 199.46 & 653.60 & 654.45 \\ 1\ 027.03 & 455.78 & 222.30 & 260.80 \\ 626.51 & 279.59 & 136.08 & 161.78 \end{pmatrix}。$$

$|s(2,3)| = s_{sum}(2,3)$ ，故障距离预估结果为 (250km, 300km)，过渡电阻范围为 (100 Ω , 200 Ω)，如图 9 所示。此时 $\max(di/dr)=0.290\ 4\ \text{p.u./0.15 ms}$ ，根据得到的过渡电阻区间，保护的整定值被设置为 $\Delta_{1,200}=0.230\ 1\ \text{p.u./0.15 ms}$ ，保护正确动作。

对于 ABB 及 SIEMENS 公司的基于电气量导数的行波保护而言，保护的整定值为固定值，这导致保护在发生高过渡电阻故障时会存在灵敏度问题，甚至发生拒动。以本故障条件为例，若采用传统行波保护的整定值设置，保护整定值 $\Delta_{1,0}$ 为 0.425 4 p.u./0.15 ms，此时电流导数最大值小于整定值，保护拒动。图 10 展示了所提出的自适应行波保护方法和传统行波保护方法的性能对比。可以看出，通过自适应的选取整定值，所提出的方法在直流输电线路发生高阻故障时仍能正

确动作，不存在拒动情况，而在传统行波保护方法在过渡电阻大于 100 Ω 时已经开始出现拒动的情况。

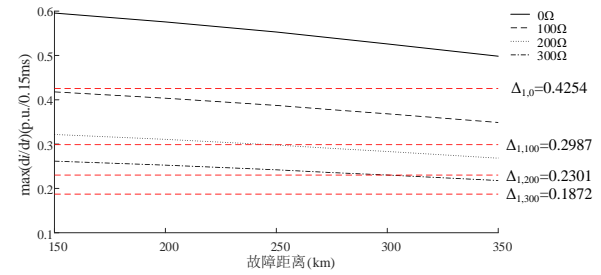


图 10 自适应行波保护方法和传统行波保护方法的性能对比

Fig. 10 Comparison of the adaptive traveling wave protection and traditional traveling wave protection

图 11 给出了基于电流高频能量的暂态量保护结果。为了更清楚的展示暂态量保护的性能，图 11 仅给出了线路末端不同过渡电阻故障的高频暂态能量。利用 db4 小波对故障后 1 ms 的暂态电流进行分解，高频能量选为尺度 3 下的能量。按照躲过区外金属性故障时计算出的高频能量进行整定，整定值为 0.003 1 kJ。可以看出，暂态量保护相较于传统行波保护灵敏度有所提高，但是仍然存在拒动区域，而本文提出的自适应行波保护方法通过改变保护的整定值，可以在这些区域正确动作。

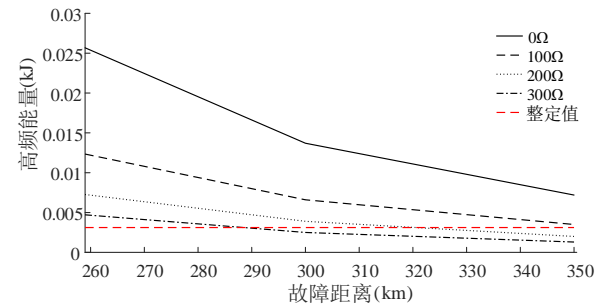


图 11 暂态量保护结果

Fig. 11 Results of transient-based protection

5 保护可靠性影响因素分析

前已述及，直流输电线路发生故障后，故障点处产生的行波具有阶跃特性，包含从高频到低频的分量。对于行波保护来说，需要较高的采样频率以精确获取故障行波的高频信息，从而进行保护原理的计算与故障判别。保护的可靠性主要有以下几点影响因素：

1) 输电线路的衰减。故障行波在直流输电线路

路上传播的过程中,会受到线路衰减的影响,直流输电线路每百公里的衰减如图 12 所示。对于目前的直流输电系统架空线路而言,线路的衰减影响不大,而随着直流输电技术向大容量,远距离发展,长线路发生故障时,故障行波尤其是高频分量在线路上传播过程中衰减严重,可能造成行波中部分频率成分在到达线路首端测点时低于互感器精确工作电流(电压),导致互感器二次侧测量结果失真,影响后续保护的计算结果和故障判别。

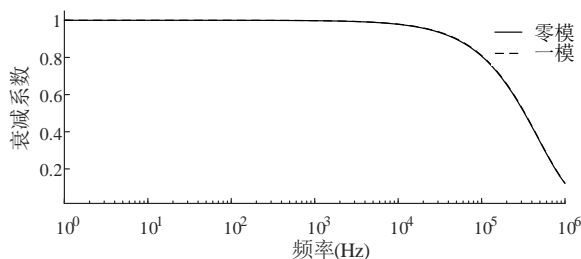


图 12 直流输电线路每百公里衰减系数

Fig. 12 Attenuation coefficient per 100 km of DC transmission line

2) 互感器传变误差

传统的电磁式互感器在测量单一频率(50 Hz)时的误差很小。输电线路发生故障后的暂态过程中,各种频率成分的信号使得互感器不能工作在稳态,在这些信号下,互感器的传变误差增大。暂态误差主要是由互感器铁芯的特性决定的。电磁式电流互感器的通带频率大概在 30 Hz~350 Hz,超出该频率范围,二次侧测量结果将产生大量误差,影响后续保护的计算。

目前国内已建成的直流工程中,电子式互感器(罗氏线圈式电流互感器、光学电流互感器)得到大量应用。电子式互感器具有较宽的通带频率范围,罗氏线圈式电流互感器能精确测量 100 kHz 以下频率的电流,而光学电流互感器理论上没有测量频率范围限制。直流工程中电子式互感器的应用为利用暂态高频信息的保护的应用提供了基础。

3) 保护方法模型误差

保护方法总借助一定的数学模型提取故障信息进行故障的区内外判别。数学模型和原始采样信号的契合程度决定了保护方法的计算误差和可靠性。对于本文所提出的自适应行波保护方法,所选择的标准拟合函数和线路首端测得的故障零模电流具有很高的相似度(误差小于 5%),能有效反映故障信息。而传统的基于电气量导数的行

波保护方法本质上将电气量当成一条直线,利用直线的斜率进行判别。

6 结论

传统的基于电气量导数的行波保护存在线路发生高过渡电阻故障时的低灵敏度问题,这是由于电气量的导数实际上会受到故障距离和过渡电阻的共同影响。本文在分析故障零模电流特性的基础上,构造标准拟合函数对故障零模电流进行拟合,得到分别反映故障距离和过渡电阻的参数,并利用该参数实现自适应行波保护。仿真结果表明所提出的保护方法能有效应对高阻故障。

本文着重于解决直流线路单极故障时的低灵敏度问题。这是出于以下考虑:实际中的高阻故障一般都发生在单极接地故障时,双极故障一般没有灵敏度问题。直流输电线路发生双极故障时将不存在零模电流。当发生双极故障时,所提出的保护方法通过设置和传统行波保护相同的整定值实现双极故障的区内外判别。

本文以点对点两端 MMC 柔性直流输电系统为例对所提出的自适应行波保护方法进行验证。事实上,直流线路两端加装限流电抗器的柔性直流电网每条输电线路的拓扑结构和点对点柔性直流输电系统是相同的,因此本文所提出的保护方法同样适用于线路两端加装限流电抗器的柔性直流电网。此外,本文所提出的方法基于直流输电线路的频变参数特性,因此该方法对于直流线路的保护具有共性。无论是传统直流还是柔性直流系统输电线路都存在明显的边界,因此该方法可以在其它直流拓扑结构中得到推广。

参考文献

- [1] 李斌,邱宏,洪潮,等.基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护[J].电力自动化设备,2018,38(02):1-8.
Li Bin, Qiu Hong, Hong Chao, et al. High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(02):1-8(in Chinese).
- [2] 徐政.柔性直流输电系统[M].机械工业出版社,2013.
- [3] V. Akhmatov et al., "Technical Guidelines and Prestandardization Work for First HVDC Grids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 1, pp. 327-335, Feb. 2014.
- [4] G. Ebner, D. Döring, F. Schettler, K. Würflinger and M. Zeller, "Fault Handling at Hybrid High-Voltage

- AC/DC Transmission Lines With VSC Converters," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 33, no. 2, pp. 901-908, April 2018
- [5] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(07): 169-175.
Dong Yunlong, Ling Weijia, Tian Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016,36(07):169-175(in Chinese).
- [6] 薛士敏, 范勃旻, 刘冲, 等. 双极柔性直流输电系统换流站交流三相接地故障分析及保护[J]. 高电压技术, 2019, 45(01): 21-30.
Xue Shimin, Fan Boyang, Liu Chong, et al. Fault Analysis and Protection Scheme for Converter AC Three-phase Grounding of Bipolar HVDC Systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2019,45(01):21-30(in Chinese).
- [7] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887.
He Jiawei, Li Bin, Li Ye, et al. A Fast Directional Pilot Protection Scheme for the MMC-based MTDC Grid[J]. *Proceedings of the Csee*, 2017,37(23):6878-6887(in Chinese).
- [8] X. Han, W. Sima, M. Yang, L. Li, T. Yuan and Y. Si, "Transient Characteristics Under Ground and Short-Circuit Faults in a ± 500 kV MMC-Based HVDC System With Hybrid DC Circuit Breakers," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 33, no. 3, pp. 1378-1387, June 2018
- [9] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 多端直流系统分区协调保护策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(04): 105-112.
Wu Jing, Yao Liangzhong, Wang Zhibing, et al. Coordinated Partition Based Protection Strategy for Multi-terminal DC Systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4):105-112(in Chinese).
- [10] 孙栩, 曹士冬, 卜广全, 等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(03): 678-682.
Sun Xu, Cao Shidong, Bu Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. *Power System Technology*, 2016,40(03):678-682(in Chinese).
- [11] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
Li Bin, He Jiawei, Feng Yadong, et al. Key Techniques for Protection of Multi-terminal Flexible DC Grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016,40(21):2-12(in Chinese).
- [12] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3176-3186.
Tang Lanxi, Dong Xinzhou, Shi Shenxing, et al. Principle and Implementation of Ultra-High-Speed Travelling Wave Based Protection for Transmission Line of Flexible HVDC Grid[J]. *Power System Technology*, 2018,42(10):3176-3186(in Chinese).
- [13] 冯谦. 多端柔性直流电网新型保护技术研究[D]. 山东大学, 2017.
Feng Qian. Research on Novel Protection Scheme for VSC-based Multi-terminal DC Grid[M]. Shandong University, 2017(in Chinese).
- [14] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(06): 1752-1759.
Dong Xinzhou, Tang Lanxi, Shi Shenxing, et al. Configuration Scheme of Transmission Line Protection for Flexible HVDC Grid[J]. *Power System Technology*, 2018,42(06):1752-1759(in Chinese).
- [15] J. Liu, N. Tai and C. Fan, "Transient-Voltage-Based Protection Scheme for DC Line Faults in the Multiterminal VSC-HVDC System," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 3, pp. 1483-1494, June 2017.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.
Zheng Wei, Zhang Nan, Yang Guangyuan, et al. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. *Power System Protection & Control*, 2015,43(24):149-154(in Chinese).
- [18] 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(04): 179-185+24.
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(04):179-185+24(in Chinese).
- [19] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 张广斌, 朱子钊, 张敏. ± 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(in Chinese).
- [20] 王钢, 李志铿, 李海锋. ± 800 kV 特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007(21): 40-43+48.
Wang Gang, Li Zhikeng, Li Haifeng. Transient Based Protection for ± 800 kV UHVDC Transmission

- Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007(21):40-43+48(in Chinese).
- [21] 束洪春,田鑫萃,张广斌,刘可真,孙士云.±800kV 直流输电线路的极波暂态量保护[J].中国电机工程学报,2011,31(22):96-104.
Shu Hongchun, Tian Xincui, Zhang Guangbin, et al. Protection for ±800 kV HVDC Transmission Lines Using Pole Wave Transients[J]. Proceedings of the Csee, 2011,31(22):96-104(in Chinese).
- [22] 徐敏,蔡泽祥,刘永浩,等.基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J].电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
Xu Min, Cai Zexiang, Liu Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1):259-265(in Chinese).
- [23] 韩昆仑,蔡泽祥,贺智,等.高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J].电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 20-25.
Han Kunlun, Cai Zexiang, He Zhi, et al. Propagation characteristic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection & Control, 2013, 41(21):20-25(in Chinese).

作者简介:



张晨浩

张晨浩(1995),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护, 294829261@qq.com;

宋国兵(1972),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护, song.gb@mail.xjtu.edu.cn

董新洲(1963),男,教授,博士生导师, IEEE Fellow, 中国电机工程学会高级会员,主要研究方向为电力系统继电保护, xzdong@tsinghua.edu.cn;

A Non-unit Adaptive Traveling Wave Protection Method for High Impedance Faults

ZHANG Chenhao¹, SONG Guobing¹, DONG Xinzhou²

(1. Xi'an Jiaotong University; 2. Tsinghua University)

KEY WORDS: current fitting; fault information extraction; estimation interval; non-unit traveling wave protection; adaptive

High voltage dc (HVDC), especially voltage source converter-based HVDC (VSC-HVDC) raises high demand for high-speed protection methods. The primary protection currently in use in practical VSC-HVDC transmission lines utilizes traveling wave-based protection (TWP), which are also applied to conventional line-commutated converter-based HVDC (LCC-HVDC). The TWP exposes the problem of low-sensitivity in detecting high-impedance faults.

In order to deal with the low-sensitivity problem, an adaptive traveling wave protection method is proposed. The initial traveling wave of the zero-sequence current can be derived as:

$$I_0(0, t) = i_{f0} \left[\sum_{n=1}^{N_f} \frac{w_n}{v_n} (e^{v_n(t-\tau)} - 1) + d \right] \varepsilon(t - \tau) \quad (1)$$

where N_f is the order of the function; τ is time delay; w_n , v_n , and d are coefficients.

According to the form of (1), a basic fitting function (BFF) is proposed to fit the zero-mode current, which is:

$$p_1(t) = -a_1 e^{-b_1 t} + c \quad (2)$$

where a_1 , b_1 , and c are the parameters of BFF. On the one hand, parameter b_1 determines the steepness of the fitting function. A bigger b_1 leads to a bigger steepness of the function, and a_1 determines the amplitude of the function. On the other hand, the distortion of the zero-mode current becomes deeper when fault distance increases, and a larger fault impedance results in a smaller amplitude of the zero-mode current. Therefore, it is considered that the parameters a_1 and b_1 obtained by fitting the zero-mode current represent the amplitude and the distortion degree of the fault zero-mode current respectively. Hence, a smaller a_1 means a larger fault impedance and a smaller b_1 means a farther fault distance.

When a fault occurs, using the parameters a_1 and b_1 can extract fault information to obtain the fault impedance estimation interval. Using the estimation interval can achieve adaptive selection of the threshold value. For a fault that is of fault impedance interval ($R_{f,i}$, $R_{f,i+1}$], the criterion is:

$$\max\left(\frac{di}{dt}\right) > \Delta_{1,R_{f,i+1}} = k_{rel} \max\left[\left(\frac{di}{dt}\right)_{R_{f,i+1}}\right] \quad (3)$$

Where $(di/dt)_{R_{f,i+1}}$ is current derivative of the external fault of $R_{f,i+1}$ fault impedance; $\Delta_{1,R_{f,i+1}}$ is the threshold value when a fault of $R_{f,i+1}$ fault impedance occurs; k_{rel} is the reliable coefficient of the adaptive TWP which is 1.2 in this paper.

The simulation study verifies the corresponding relationship between the parameters a_1 and b_1 and fault impedance and fault distance, as shown in Tab.1 and Tab.2.

Tab. 1 Fitting results of faults of different distances (100 Ω)(表 3)

Fault distance/km	a_1	b_1	c
150	0.394 8	24 642.58	0.385 3
200	0.394 3	18 236.86	0.376 1
250	0.392 1	14 428.13	0.367 2
300	0.388 8	11 856.60	0.358 9
350	0.384 9	9 968.32	0.351 3

Tab. 2 Fitting results of faults of different distances (300 Ω)(表 5)

Fault distance/km	a_1	b_1	c
150	0.248 9	23 373.57	0.243 7
200	0.248 5	17 351.90	0.238 0
250	0.247 1	13 776.95	0.232 5
300	0.245 2	11 364.73	0.227 4
350	0.242 7	9 548.92	0.222 7

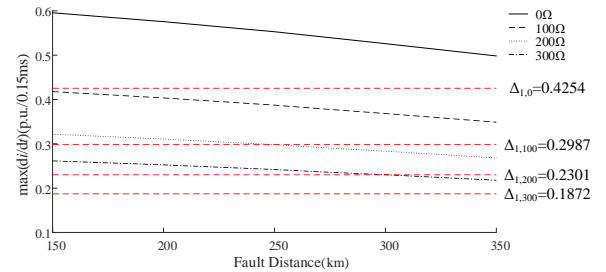


Fig. 1 Comparison of the adaptive TWP and traditional TWP(图 10)

The simulation study in Fig.1 shows that, the proposed method can fast and effectively protect the dc transmission line, even with high fault impedance. Comparing with the traditional TWP, the proposed method has higher sensitivity and can protect wider area of the dc transmission lines.