

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190945

基于相关分析的多端直流电网线路纵联保护新原理

林湘宁, 刘琦, 范理想, 郑宇超, 童宁, 李正天

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 对于“网孔结构”的多端直流电网而言, 边界元件的缺失使其线路之间的电气距离大大减小, 导致区内、区外故障的判别存在困难。对此, 首先分析了行波在该类直流电网中的传播过程, 根据故障线路与非故障线路两侧同名行波与异名行波首波头的衰减特性差异, 引入相关分析法来表征不同行波之间的相关性。结合突变能量启动判据, 形成了一套适用于具有“网孔结构”的多端直流系统的纵联保护原理。仿真结果表明, 所提出的保护原理具有良好的速动性及选择性, 且拥有较强的抗过渡电阻能力和抗噪能力。

关键词: 多端直流电网; 网孔结构; 相关分析; 突变能量; 线路纵联保护

A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis

LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, ZHENG Yuchao, TONG Ning, LI Zhengtian
(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology
(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Lacking the boundary elements greatly reduces the electrical distance between the lines, which makes it difficult to distinguish internal fault and external fault. To solve this problem, this paper first analyzes the complex refraction and reflection phenomenon in the VSC-MTDC, and the attenuation difference between the homonymic traveling waves and anonymous traveling waves are analyzed. Based on the correlation analysis, above difference is expressed by this means. A novel protection scheme for meshed VSC-MTDC is proposed using correlation coefficient differential protection and the superimposed component energy start-up criterion. By means of simulation analysis, the proposed protection scheme works well under different fault conditions, and has good selectivity and speed.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-201999331A-0-0-00) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M642838).

Key words: VSC-MTDC; meshed structure; correlation analysis; superimposed energy; pilot protection

0 引言

多端直流输电(Multi-terminal high-voltage DC, MTDC)是直流电网发展的一个阶段, 能够实现多电源供电和多落点受电。将直流输电线路相互连接起来, 即可组成真正的直流电网, 其具有换流站数量大大减少、换流站可以单独传输功率、可灵活切换传输状态和高可靠性的优势^[1]。柔性直流输电具有有功无功独立控制、在潮流翻转时不改变电压极性、没有换相失败的问题、可以为无源系统供电、占地面积小、滤波水平低等优点^[2-4]。在两者基础上衍生

而来的多端柔性直流输电系统, 兼具二者优点, 并入多个换流站后, 能够实现多端供电和多落点受电, 并且可以采用不同的拓扑结构形成直流网络从而使运行可靠性、经济性和控制灵活性大大提高^[5]。

直流线路发生故障时, 各换流站立即向故障点馈入短路电流, 这使得故障电流上升速度快、幅值大, 几毫秒内故障电流就会增大到峰值, 因此对故障的切除和保护快速性提出了更高要求^[6-7]。现有的多端直流输电系统的线路保护措施可以分为两大类。

第一类为单元保护, 它主要借助通信系统来完成双端电气量信息交换来实现线路故障判别。但目前电流差动的保护原理仅成功应用于无需电容电流补偿的数十千米级柔直输电线路^[8]。理论上, 纵联电流差动保护能保证绝对的选择性, 但是长输电线

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5100-201999331A-0-0-00); 中国博士后科学基金项目资助(2018M642838)

路需考虑分布电容的影响,保护的判据要等暂态过程消失后才能启动,并且传输信息时间也会大大增加,不能满足速动性要求;因此电流差动保护通常作为直流输电线路的后备保护^[9]。文献[10]通过 Hausdorff 距离度量了故障线路与非故障线路的两侧同名行波与异名行波首波头的衰减特性差异,形成了一套波形匹配式纵联差动保护。文献[11]提出了一种利用电流突变量夹角余弦值的纵联保护方法。但上述方法都存在数据同步、通道延时、两侧保护通道失效等造成保护误动、拒动等问题^[12]。

第二类为非单元保护,即仅依靠单端量来完成对输电线路故障的识别,不依赖于同步对时和通信系统,具有良好的速动性。目前投运的常规高压直流输电线路采用行波保护、微分欠压保护作为主保护,并已经具有较好的运行经验^[13-15]。文献[16-17]利用边界对高频分量的阻滞作用,借助故障高频暂态能量在边界两侧的差异判断出区内、区外故障,降低了整定的难度,但仍需仿真进行整定。文献[18]针对两端装有电感的线路,提出了基于多端故障测距的保护判据,使得保护整定不依赖于仿真且有较高的可靠性。

然而,当线路两端的电抗器缺失时,基于边界条件的保护原理不再适用。对此结构,文献[19]分析了电容支路和直流线路入口处的暂态电流特征,提出了一种基于暂态电流 Pearson 相关系数的线路保护原理,能在 3 ms 内识别故障,抗干扰能力强。但此原理只适用于两电平、三电平换流器的直流电网,对于 MMC 换流器构成的系统,电容支路和线路入口电流不再满足这个规律,如何进行相似性分析有待进一步深入探索。行波类保护属于一种基于故障分量的原理,理论上不受电容放电特征的影响,非常具有前景。文献[20]根据接地故障中同时出现的线模、零模行波的波速差,提出了基于到达时间差异的单端测距式保护原理。但此原理对区内远端和区外近端故障的识别存在困难,只能主动内缩保护边界来保证选择性,导致区内远端存在死区。

借鉴上述文献提供的思路,针对“网孔结构”的多端柔性直流电网,本文提出一种基于相关分析法的纵联保护新原理。基于故障时前行波、反行波传播特征,引入波形相关系数来表征不同故障行波的相关程度;并根据区内、区外故障时前行波、反行波之间相关系数的差异来构造保护判据;结合突变能量启动判据形成了一套快速、可靠的纵联保护新原理。最后在 PSCAD/EMTDC 平台仿真验证了本保护原理在各种故障工况情况下的有效性。

1 多端柔直线路故障首波头传播特性分析

1.1 首波头传播特性分析

文献[10]分析了多端直流电网线路发生故障后,故障线路与非故障线路的波头传播特性,不妨以图 1 所示的四端柔直系统故障为研究对象,直流线路的首、末两端均设有保护装置。

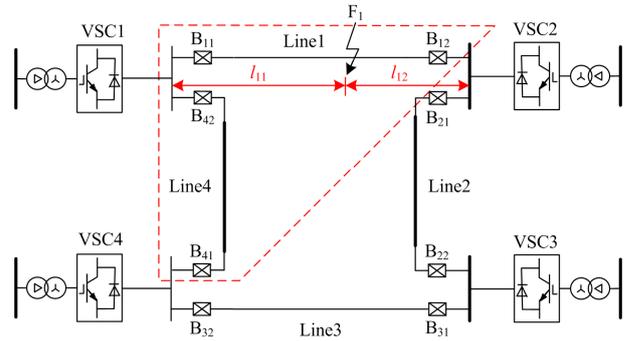


图 1 四端柔直系统的结构及线路故障示意图

Fig. 1 Structure of four-terminal VSC-MTDC and its line fault

线路 Line-1 发生故障时,故障点 F_1 距离保护 B_{11} 的线路长度为 l_{11} , 距离保护 B_{12} 的线路长度为 l_{12} , 线路 Line-4 的长度为 l_4 。由于在直流线路中,极分量相互之间耦合并且零模分量色散现象明显,故选择线模行波作为分析对象。故障行波在红色虚线框内的传递过程展现于图 2。

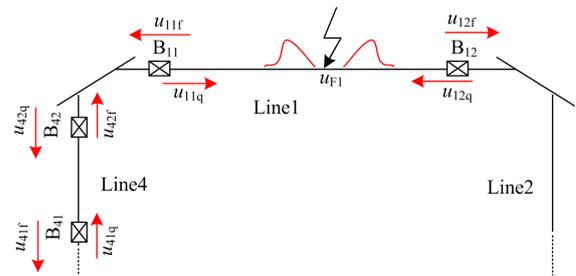


图 2 故障首波头折反射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fault premier travelling wave refraction and reflection

记 u_{abc} 为各保护所感受的故障行波,其中, a 表示行波所属线路的编号(编号为 1~4); b 表示线路端号(1、2 分别表示线路首端和末端); c 表示行波的传播方向(f、q 分别为前行波和反行波)。

u_{F1} 表示初始行波幅值,表达式为^[21]

$$u_{F1} = \frac{-\sqrt{2}Z_1 U_F}{Z_0 + Z_1 + 4R_f} \quad (1)$$

式中: Z_0 、 Z_1 分别代表线路的零模波阻抗和线模波

阻抗; U_F 为线路故障前的对地电压; R_f 为过渡电阻。

初始行波将沿线路两侧传播, 同时伴随着衰减, 衰减程度可以通过故障行波初始幅值乘以衰减量来表达, 则到达线路两侧保护的首波头表达式为

$$\begin{cases} u_{11f} = u_{F1} e^{-\lambda l_1} \varepsilon \left(t - \frac{l_{11}}{v_1} \right) \\ u_{12f} = u_{F1} e^{-\lambda l_2} \varepsilon \left(t - \frac{l_{12}}{v_1} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{11f} 和 u_{12f} 分别表示保护 B_{11} 和 B_{12} 首次感受到的电压行波; ε 为阶跃函数, 表示行波波头到达时刻; v_1 表示线模行波的波速度, $v_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$; l 表示传播的距离, $e^{\lambda l}$ 表示衰减量, 线模分量的衰减系数为

$$\lambda_1 = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} \quad (3)$$

式中, R_1 、 L_1 、 G_1 、 C_1 分别代表单位长度线路的电阻、电感、电导、电容。

首波头 u_{11f} 到达线路末端时, 将在换流站 1、换流站 2 处发生折、反射现象, 则保护 11、保护 12 处首次感受到的线模前行波为

$$\begin{cases} u_{11q} = u_{11f} \cdot K_{f1} = u_{F1} e^{-\lambda l_1} \varepsilon \left(t - \frac{l_{11}}{v_1} \right) \cdot K_{f1} \\ u_{12q} = u_{12f} \cdot K_{f2} = u_{F1} e^{-\lambda l_2} \varepsilon \left(t - \frac{l_{12}}{v_1} \right) \cdot K_{f2} \end{cases} \quad (4)$$

保护 42 处感受到的故障前行波为

$$u_{42q} = u_{11f} \cdot K_{z1} = u_{F1} e^{-\lambda l_1} \varepsilon \left(t - \frac{l_{11}}{v_1} \right) \cdot K_{z1} \quad (5)$$

换流站 1、换流站 2 处对行波的折射系数分别为 K_{z1} 、 K_{z2} , 反射系数分别为 K_{f1} 、 K_{f2} 。需注意, 此时保护 42 处没有故障反行波出现。同理, 行波也将在换流站 4 处发生折、反射现象, 在这里仅需考虑反射, 所以同理可假设换流站 4 处的行波反射系数为 K_{f4} , 则保护 41 处首次感受到的线模前行波为

$$u_{41q} = u_{41f} K_{f4} = u_{F1} e^{-\lambda(l_{11}+l_4)} \varepsilon \left(t - \frac{l_{11}}{v_1} - \frac{l_4}{v_1} \right) K_{z1} K_{f4} \quad (6)$$

线路 Line-1 上的 F_1 处故障时, 保护将率先感受到故障反行波, 随后由线路末端反射出现故障前行波, 此时故障前行波与反行波同时出现。为方便分析, 定义保护 11 处的前行波 u_{11q} 与保护 12 处的前行波 u_{12q} 互为同名行波(同名指两处前行波), 保护 12 处的反行波 u_{12f} 互为异名行波(异名指一处前行波、一处反行波), 同理可推广如表 1 所示。

表 1 区内故障首波头表达式与相互关系

Table 1 Expression and mutual relation of premier traveling wave under internal fault

保护 11 处	相互关系	保护 12 处
u_{11q}	← 同名 → ← 异名 →	u_{12q}
u_{11f}	← 同名 →	u_{12f}

对照式(2)、式(3)的行波波头表达式, 不难发现: 区内故障场景下同名行波之间, 如行波 u_{11f} 与 u_{12f} , 仅存在传播距离不同引起的行波色散与衰减差异, 差异较小; 而异名行波之间, 如行波 u_{11f} 与 u_{12q} , 受反射系数影响, 两者之间差异较大。

对线路 Line-4 两端保护而言, 故障点 F_1 属于区外故障, 同样定义行波之间的相互关系如表 2 所示。

表 2 区外故障首波头表达式与相互关系

Table 2 Expression and mutual relation of premier traveling wave under external fault

保护 11 处	相互关系	保护 12 处
u_{41q}	← 同名 → ← 异名 →	u_{42q}
u_{42f}	← 同名 →	u_{12f}

由于行波 u_{41f} 是由 u_{42q} 沿 Line-4 传播而来的, 仅存在传播衰减, 故这一组异名行波间的差异较小; 由于前行波 u_{41q} 达到保护 41 处时, 反行波 u_{42f} 并未到达, 其幅值为零, 故两者之间差异较大。同名行波与之类似, 也会出现一组同名行波差异较大, 另一组同名行波较小的情况。

1.2 相关性分析

在探寻两个变量之间的联系时, 通常将相关关系作为衡量的标准, 相关关系意在表现出两个变量之间的相互关联^[22]。统计学中, 相关关系可以分成三类: 正相关、负相关、零相关。参照此关系, 可以得到波形相关系数。为研究 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的波形引入:

$$\delta = x(t) - \alpha y(t) \quad (7)$$

其中 α 为常数。由式(7), 在确定时间窗内为求解使得两波形最相似的 δ 值, 可利用在该确定时间窗内 δ^2 的平均值 D 来求解, 求解过程如下。

令 $\frac{dD}{d\alpha} = 0$, 求解最小的 α , 可以得到最小的均方差:

$$D_{\min} = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt [1 - \rho_{xy}^2] \quad (8)$$

其中, $\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt}{\sqrt{\int_0^T x^2(t)dt} \sqrt{\int_0^T y^2(t)dt}}$, 若两波形为离

散采样点序列, 则 $\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x^2(n)} \sqrt{\sum_{n=1}^N y^2(n)}}$ 。

可见 ρ_{xy} 越大, D 就越大, 两个波形的相关程度最高。在此, 将 ρ_{xy} 定义为两组信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 之间的波形相关系数。

1.3 行波差异分析

为研究前一部分所述特征, 得到一致结论, 本文基于张北四端柔性直流输电系统结构和参数在 PSCAD/EMTDC 上搭建了模型, 具体参数会在第 3 节中展现。设置故障 F_1 为图 1 中 Line-1 中点发生极间短路, 故障发生时刻为 0 ms, 记录波头时间窗长为 0.75 ms。

1) 区内故障

参考图 1 中红色虚线框内部分, 对于 Line-1 故障 F_1 发生于区内, 记录其首、末端的保护 B_{11} 、 B_{12} 处的线模行波波形, 如图 3 所示。

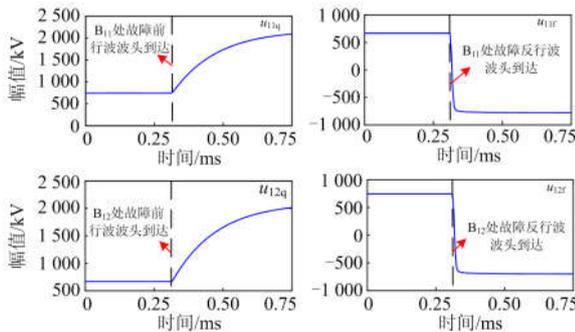


图 3 区内故障场景下行波示意图

Fig. 3 Traveling wave under internal fault

根据式(7)和式(8), 借助相关系数来衡量上述同名、异名行波波形的相似度, 得到结果如表 3 所示。

表 3 区内故障各行波间相关系数

Table 3 Correlation coefficients of traveling wave under internal fault

	B ₁₂ 前行波	B ₁₂ 反行波
B ₁₁ 前行波	0.999 8	-0.933 9
B ₁₁ 反行波	-0.932 9	0.999 9

由表 3 可知, 区内故障工况下同名行波的相关系数极性相同, 且接近于 1, 为正相关; 异名行波的相关系数极性相反, 且绝对值也非常接近 1, 为负相关。说明同名、异名行波间相关性非常强。

2) 区外故障

F_1 处发生故障时, 记录 Line-4 首、末端保护线模行波波形, 如图 4 所示。

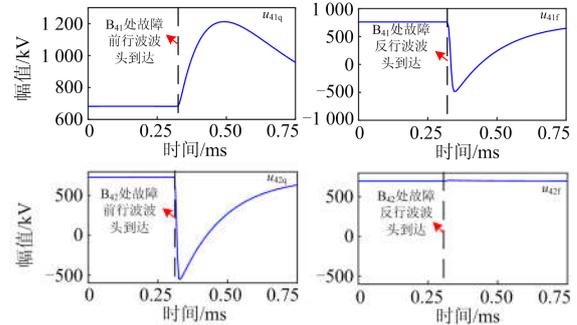


图 4 区外故障场景下行波示意图

Fig. 4 Traveling wave under external fault

计算保护感受的同名、异名行波波形相似度, 结果如表 4 所示。

表 4 区外故障各行波间相关系数

Table 4 Correlation coefficients of traveling wave under external fault

	B ₄₂ 前行波	B ₄₂ 反行波
B ₄₁ 前行波	-0.775 0	-0.234 7
B ₄₁ 反行波	0.993 1	0.014 5

可见, 区外故障工况下, 同名行波中前行波相关系数绝对值接近 1, 极性相反, 为负相关; 反行波相关系数接近为零, 为零相关。异名行波中 B_{41} 前行波与 B_{42} 反行波, 相关系数接近为零, 是零相关, B_{41} 反行波与 B_{42} 前行波相关系数接近 1, 是正相关。

综合上述区内、区外故障的行波相关性衡量的结果, 可得出如下结论: 同名行波之间在区内故障工况下为正相关, 而在区外故障工况下为负相关或零相关; 异名行波之间在区内故障工况下为负相关, 而在区外故障工况下为正相关或者零相关。

2 基于相关分析的纵联保护方案

2.1 突变能量启动判据

对于电抗器装设在换流站出口的“网孔结构”多端直流输电系统, 基于边界条件的启动判据将不再适用。而“网孔结构”中线路之间的行波透射将增加, 保护安装处检测的突变能量也更加明显, 可以据此构造突变能量启动判据。

整定时还需考虑: 当区内线路的几何对称点上发生故障时, 线路两侧均率先感受到前行波。此时两个前行波均由同一个初始行波生成, 若不对这种情况加以排除, 就会有误动的风险。

为此, 本文对上述误动风险的排除方法为: 对于任意一条线路 i , 在整定过程中, 首先找到其几何对称中心所在的线路 j ; 然后在对称中心设置最轻微故障, 并乘以一个可靠系数。这样, 线路 i 前行波启动区和反行波启动区恰好可以进行隔离。同时, 该故障是以最轻微的单极接地故障($300\ \Omega$ 过渡电阻)作为基准, 因此线路 i 启动判据的灵敏性正好可以得到保障。具体实施过程如下。

假设系统共有 N 条线路, 系统线路总长度为

$$l_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N l_i \quad (9)$$

假设某条线路 i , l_i 为第 i 条线路的长度, 该线路两侧的保护分别为 B_{i1} 与 B_{i2} 。从系统中总可以找到线路 i 中点的几何对称点。此时, 两点间两侧线路的距离相同, 为 $l_{\text{sum}}/2$, 对称点和故障点的示意图如图 5 所示。

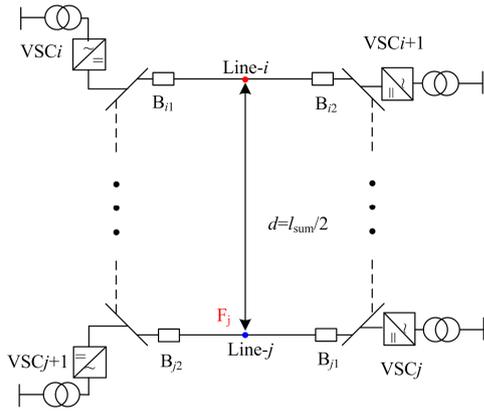


图 5 环形电网中的故障点及其对称点

Fig. 5 Fault point and its symmetric position in loop grid

故障发生于 F_j 处时, 线路 $\text{Line-}i$ 两侧的 B_{i1} 和 B_{i2} 所感受到的故障前行波、反行波完全相同。以 B_{i1} 为例, F_j 处故障时, 保护先感受到前行波, 计算其前行波启动判据的整定值为

$$E_{iqk}^{\text{set}} = \left[\Delta u_{iq1}(k) + Z_{i1} \times \Delta i_{iq1}(k) \right]_{\text{max}}^2 \quad (10)$$

式中: $\Delta u_{iq1}(k)$ 、 $\Delta i_{iq1}(k)$ 分别表示线路 i 的电压、电流故障分量; 下标 i 表示线路标号; k 表示线路端号。

为避免保护区相互重叠, 可参考传统的欠范围式整定方法, 在整定值的基础上再乘以一个可靠系数 K_{rel} 来隔离保护 B_{i1} 、 B_{i2} 的启动范围。

同理, 反行波启动判据的整定值为

$$E_{irk}^{\text{set}} = \left[\Delta u_{ir1}(k) - Z_{i1} \times \Delta i_{ir1}(k) \right]_{\text{max}}^2 \quad (11)$$

综上, 每个保护均设置前行波和反行波两种启

动判据, 并将两个判据设置为“或”逻辑; 任何一种判据启动后, 其他判据立即闭锁。总体故障启动判据可写为

$$\left(E_{iqj} > K_{\text{rel}} \cdot E_{iqj}^{\text{set}} \right) \cup \left(E_{irj} > K_{\text{rel}} \cdot E_{irj}^{\text{set}} \right) \quad (12)$$

以保护 B_{i1} 为例, 在本文设计下, 突变能量启动判据的启动范围绘制如图 6 所示, 保护 B_{i2} 与之类似。

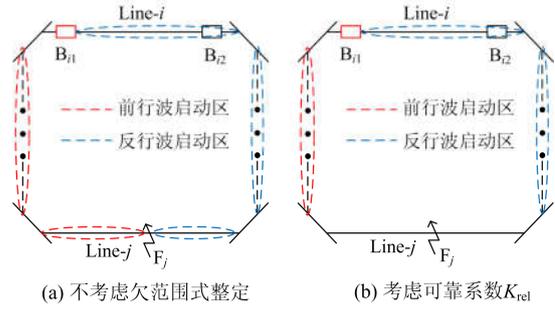


图 6 启动判据的保护范围

Fig. 6 Protection domain of start criterion

由图 6 可知, 考虑 K_{rel} 适当收缩保护区, 明确启动范围。另一方面, K_{rel} 取值不宜过大, 以免影响到保护对区内故障的响应能力。经慎重考虑, 仿真验证后, 本文取 K_{rel} 为 1.2。

2.2 基于相关分析法的保护判据

根据 1.3 节中的分析, 可设计基于相关分析法的动作判据。区内故障场景下, 同名行波之间表现出正相关, 而异名行波之间为负相关。在区外故障场景下, 在相关性计算时会有行波波头尚未到达的情况, 一组行波几乎没有幅值; 对于包含了该组幅值很小的故障行波, 其相关系数结果的正负值并不能确定。但可以肯定地说, 相关性将会较低, 即相关系数的绝对值会较小。

为了排除区外故障情况下产生的幅值接近零的行波对判据正确性的影响, 需设置相应的门槛。当相关系数的绝对值大于该门槛时, 该相关系数有效, 考虑其正负值; 反之, 其绝对值小于该门槛时, 该相关系数无效, 不考虑其正负值, 视其为零相关。相关系数与相关性定义的划分范围如图 7 所示。

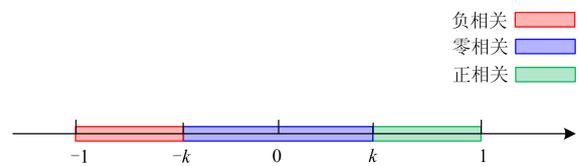


图 7 相关系数与相关性定义的划分范围

Fig. 7 Division domain of correlation coefficient and relevant definition

详尽地考虑区内、区外故障工况下的行波相关系数的差异是构造保护动作判据的基础,总结如下:

1) 在区外故障下,必然出现一组行波数据幅值接近零,因此会出现两个零输出。

2) 在区内非近区故障时,两组同名行波为正相关,异名行波为负相关,不可能出现零输出。

3) 在区内近区故障时,故障行波会在故障点和线路末端之间发生多次快速折反射,此时故障波头不易被捕捉,但不会出现零相关。保留一定的裕度,认为区内近区故障最多会产生一个零相关输出。

这样设置基于相关分析法的保护判据为

$$\begin{cases} AUBUCUDUE \\ A = \{P_{s1}P_{s2}P_{d1}P_{d1}\}, B = \{\overline{P_{s1}}P_{s2}P_{d1}P_{d1}\} \\ C = \{P_{s1}\overline{P_{s2}}P_{d1}P_{d1}\}, D = \{P_{s1}P_{s2}\overline{P_{d1}}P_{d1}\} \\ E = \{P_{s1}P_{s2}P_{d1}\overline{P_{d1}}\} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P 表示事件 $\{\rho \in (-k, k)\}$, 其下标 $s1$ 、 $s2$ 表示两组同名行波的相关系数; $d1$ 、 $d2$ 表示两组异名行波的相关系数。

考虑到在区外故障工况下一组故障行波的幅值很小,计算行波相关系数时会产生较小的虚假值,因此需要对门槛 k 进行设置。计算相关系数时,与故障严重程度并无直接联系,在仿真多组区外故障场景下的数据后,可取出两个相关系数中绝对值较大的值,并乘以一个可靠系数,作为动作判据门槛的求取,表达式如下:

$$k = K_{set} \max(|\rho_{same}|, |\rho_{diff}|) \quad (14)$$

式中, ρ_{same} 、 ρ_{diff} 分别代表同名行波相关系数和异名行波相关系数。对于线路 i 上的两侧保护 B_{i1} 、 B_{i2} , 确定相关系数的表达规则如表 5 所示。

表 5 相关系数表达规则

Table 5 Correlation coefficient expression rule

	B_{i2} 前行波	B_{i2} 反行波
B_{i1} 前行波	ρ_{same1}	ρ_{diff}
B_{i1} 反行波	ρ_{diff2}	ρ_{same2}

2.3 纵联保护方案

综上所述,可以得到本文柔性直流线路纵联保护方案如图 8 所示,其流程如下:

1) 记录本地保护安装处极电压和极电流,经过凯伦贝尔变换解除耦合后合成线零模行波。

2) 通过突变能量启动判据判断故障是否发生,若能量未能达到门槛,则返回步骤 1)。否则保护启动,记录启动时刻,将启动时刻设为起始零时刻,向后截取长度为 t_{win} 的数据窗记录故障前行波和故

障反行波的波头,并将信息发送到对侧保护位置处。

3) 本地保护采集行波数据后,检测收到的信息是否采集完毕,收到数据采集完成信号后进入步骤 4)。

4) 对应计算四组波形数据的相关系数,根据图 7 的定义可以得到四组输出结果,若满足式(13)输出为真,则向直流断路器发出跳闸指令,否则返回步骤 1)。

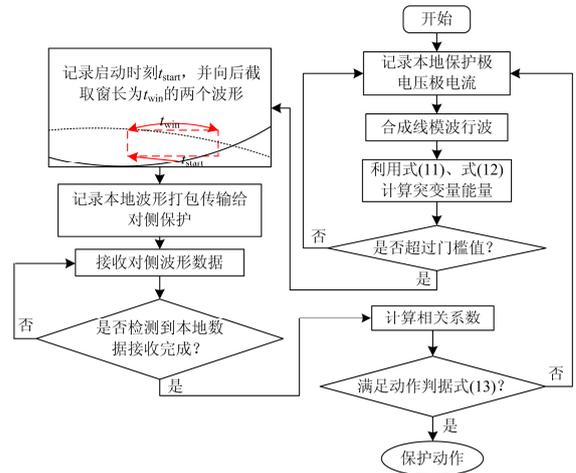


图 8 基于相关分析法的纵联保护方案流程图

Fig. 8 Flowchart of pilot protection scheme based on correlation analysis

另外,上述保护方案实施前提条件为先排除雷击干扰的场景。雷击线路但不会引起闪络称为雷击干扰,应排除这种干扰。对本文所提保护原理而言,雷电波具有波头陡峭、能量含量大等特点,本文基于突变能量启动判据对此难以闭锁。此外,文献[24]表明雷击干扰会在直流线路上产生暂态行波,并且其形态与故障行波的形态极为相似,可能引发动作判据误动作。

为了解决上述问题,可借助辅助判据与原保护配合来消除非故障性雷电波的影响。对于雷电波的快速识别方法,学者们已经进行了较为广泛的研究,如文献[24]在PSCAD中建立精确的雷击模型和杆塔模型,分析了雷击浪涌对绝缘子以及直流换流站的影响;文献[25]中提出的基于多个电压比的方法,以及文献[26]中提出的基于不同尺度小波熵比值的方法。目前有关雷击干扰识别的研究已经较为全面和成熟,雷击识别的具体方法不作为本文的重点研究内容来展开讨论。

3 参数整定

在 PSCAD/EMTDC 上搭建张北四端直流系统

模型, 其结构可参见图 1, 对于仿真参数选取和门槛值的整定有如下讨论。

1) 采样率和数据窗的选取

考虑数据采集在行波保护中的重要性^[27], 需要在满足多端柔直电网技术指标的前提下, 选取合适的数据窗和采样频率。

为满足速动性要求, 以区内近区故障为极端延时场景。此时, 近故障侧保护会迅速感受到故障行波, 而远故障侧却需要等待线路传播延时, 需满足如下约束。

$$t_1 + t_2 + t_{win} \leq t_3 \quad (15)$$

式中, $t_1 = l/v_1$ 、 $t_2 = l/v_c$, l 为整条输电线路长度, v_1 、 v_c 分别为线模行波波速、信息传播速度, 两者分别取 $0.295 \text{ km}/\mu\text{s}$ 、 $0.204 \text{ km}/\mu\text{s}$; t_3 为换流器极限耐受时间(已考虑断路器动作延时), 为 2.5 ms ; $t_{win} = N/f_s$ 为记录行波信息的数据窗长, N 为所取采样点个数, f_s 为采样率。

同时, 为避免数据窗过长时对侧反射回来的二次波混入窗内, 影响故障波头判别, 有如下约束:

$$\frac{2l}{v_1} \geq t_{win} \quad (16)$$

考虑柔直线路长度一般不超过 200 km , 取采样点个数为 75 , 通过式(15)和式(16)得到采样频率范围为

$$f_s \geq 65 \text{ kHz} \quad (17)$$

采样率的选取应在满足保护技术要求的前提下, 综合保护计算量、投资成本等因素进行权衡。

本文在满足式(17)的前提下, 计及一定的裕度, 设置采样频率为 200 kHz , 窗长 t_{win} 为 0.375 ms 。

2) 启动判据门槛值整定

各保护的前、反行波突变量能量启动门槛需分别进行整定。整定门槛应对单极接地故障、极间短路故障都能有效启动, 各保护启动判据的整定值及线路基本信息列于表 6 中。

表 6 四端直流系统各保护的启动整定值

Table 6 Setting value of line protection for VSC-MTDC

线路参数 编号	L/km	位置 端号	整定值		
			$K_{rel} \cdot E_{ij}^{set} / \text{kV}^2$	$K_{rel} \cdot E_{ij}^{set} / \text{kV}^2$	
康保- 丰宁	Line1	184.4	$j=1$	1.335×10^4	7.637×10^3
			$j=2$	1.071×10^4	5.359×10^3
丰宁- 北京	Line2	101	$j=1$	1.151×10^4	5.982×10^3
			$j=2$	1.132×10^4	5.064×10^3
北京- 张北	Line3	131.1	$j=1$	8.470×10^3	4.528×10^3
			$j=2$	8.127×10^3	4.142×10^3
张北- 康保	Line4	78.3	$j=1$	7.981×10^3	3.814×10^3
			$j=2$	8.642×10^3	4.753×10^3

3) 动作判据的门槛值整定

动作判据 k 宜取一个稍大于零的值来排除产生虚假值的区外故障场景。通过大量仿真遍历每条线路的区外故障场景, Line-1 上保护四组行波的相关系数统计结果为: $\max(|\rho_{same}|, |\rho_{diff}|)$ 的范围在 0 到 0.2 之间不断浮动, 考虑到一定的裕度, 可靠系数 K_{set} 设置为 1.2 , 动作判据门槛 k 的取值为 0.24 。

4 仿真研究

4.1 区内故障

以线路 Line-1 中点处极间金属性故障场景为例, 记录线路 Line-1 两侧保护的突变能量启动判据动作情况如图 9 所示。

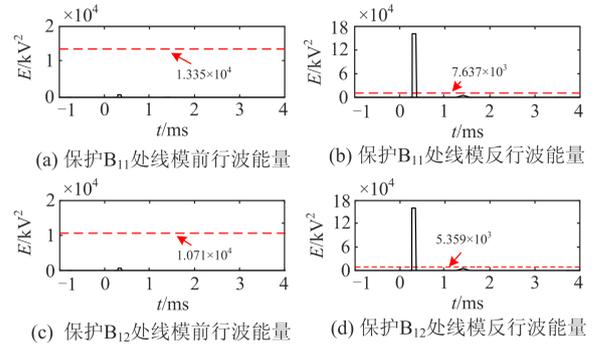


图 9 区内中点极间故障时行波突变能量

Fig. 9 Travelling superimposed energy under internal midpoint interpole fault

可见, 保护 B_{11} 与 B_{12} 处的前行波能量均未超过整定值, 前行波判据不启动; 而反行波能量的启动判据分别于 0.32 ms 和 0.33 ms 先后启动, 以启动时刻为起点向后截取长度为 t_{win} 的行波数据, 其结果如图 10 所示。

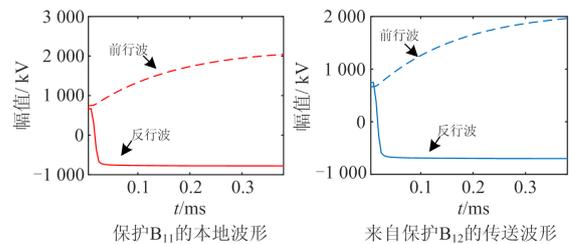


图 10 区内中点极间故障时保护的行波波形

Fig. 10 Traveling wave of B_{11} and B_{12} under Line-1 fault

将图 10 中的行波数据进行分组求取相关系数, 计算结果为

$$\rho_{same1} = 1.0000 \quad \rho_{same2} = 1.0000$$

$$\rho_{diff1} = -0.9330 \quad \rho_{diff2} = -0.9329$$

根据式(13)的动作判据, 保护 B_{11} 动作跳开; 同

理保护 B_{12} 收到对侧保护传输过来的行波信息图后, 也将计算相关系数, 由于行波信息一致, 计算结果也将满足动作判据, 保护 B_{12} 动作跳开。故障线路两侧保护能可靠动作, 及时切除故障线路。

线路 Line-1 中点处单极接地场景下, 启动判据动作情况与图 9 类似, 不再展示。此时截取 t_{win} 长度的行波信息, 如图 11 所示。

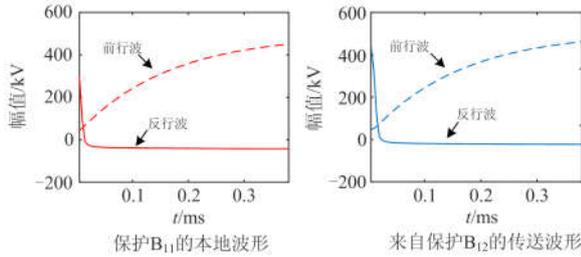


图 11 区内中点接地故障时保护的行波波形

Fig. 11 Traveling wave of B_{11} and B_{12} under Line-1 fault

将截取的波形分组求取相关系数, 计算结果为

$$\begin{aligned} \rho_{same1} &= 1.0000 & \rho_{same2} &= 1.0000 \\ \rho_{diff1} &= -0.9779 & \rho_{diff2} &= -0.9891 \end{aligned}$$

根据式(13)的动作判据, 此时不存在零相关, 两侧保护动作, 切除故障线路。

4.2 区外故障

考虑到区外故障时最恶劣的故障情况为线路 Line-2 的首端(即靠近保护 B_{21} 处)发生极间金属性短路故障。考察 Line-1 上两侧保护 B_{11} 与 B_{12} 处的故障前行波、反行波突变能量情况如图 12 所示。

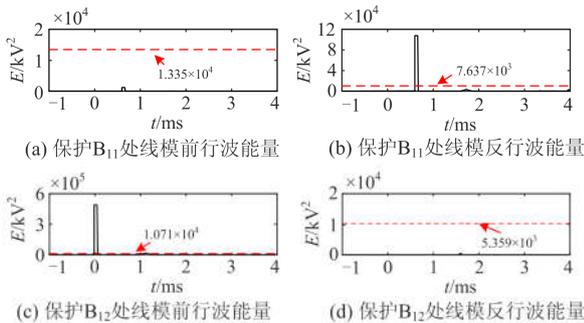


图 12 区内故障时行波突变能量

Fig. 12 Travelling superimposed energy under external fault

可见, 保护 B_{12} 处的前行波突变能量率先超过整定值, 启动时刻为 $t_{12} = 0.01$ ms, 截取此时刻后保护窗长的前行波和反行波波形作为行波信息图 T_{12} , 并将其发送给保护 B_{11} 。此后故障行波经过一段时间传输, 保护 B_{11} 处的反行波能量也越过启动门槛, 在 $t_{11} = 0.61$ ms 时启动, 随后记录前行波和反

行波波形的行波信息图 T_{11} 。此时距离保护 B_{12} 发出行波信息图 T_{12} 已有 0.6 ms, 保护 B_{11} 已经收到了保护 B_{12} 传输来的行波信息图 T_{12} , 记录如图 13 所示。

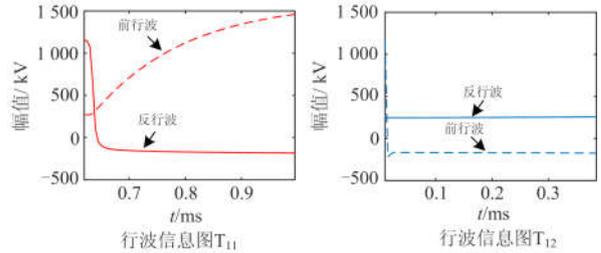


图 13 区外故障时线路 1 两端保护的行波波形

Fig. 13 Traveling wave of B_{11} and B_{12} under Line-1 fault

由图 13 可见, 保护 B_{12} 处前行波启动时, 反行波信息中是不包含故障行波波头的, 分别计算两组信息图 T_{11} 、 T_{12} 中四组行波间的相关系数, 结果为

$$\begin{aligned} \rho_{same1} &= -0.9163 & \rho_{same2} &= 0.0285 \\ \rho_{diff1} &= -0.9904 & \rho_{diff2} &= -0.0243 \end{aligned}$$

上述结果不满足判据式(13), 保护 B_{11} 复归; 同理, 在保护 B_{12} 处收到了保护 B_{11} 传递过来的信息图 T_{11} 后, 也将计算相关系数, 因为行波信息一致, 保护 B_{12} 处也将不满足动作判据, 保护 B_{12} 复归。此时判定为区外故障, 保护不动作。

4.3 保护性能分析

本文所用故障分量为线模分量, 在发生单极接地故障时, 线模行波的等效阻抗将增大^[27], 导致其幅值降低, 行波信息获取的要求更为严苛。故分析保护方案的性能时, 重点考核不同单极接地场景下的保护性能。

1) 抗过渡电阻能力

以线路 Line-1 上发生单极接地故障场景为例, 遍历不同故障位置和过渡电阻工况下的故障。计算其首端保护 B_{11} 的波形相关性, 并记录保护的动作为如表 7 所示。

由表 7 不难看出: 在发生不同场景的区内故障情况下, 保护能够可靠动作, 识别并隔离故障, 且逐渐提高过渡电阻时, 在过渡电阻达到 300 Ω 后, 保护仍能够正常动作, 可见本文所设计的保护原理具有较强的抗过渡电阻能力。

2) 抗噪能力

混入原信号的噪声经平方后会使得保护感受到的突变能量增大, 这对于基于突变能量的启动判据而

言是有利的。但噪声会淹没部分原有的信息, 造成行波之间的相关性减弱。行波之间相关性减弱后, 计算结果中会出现更多零相关; 保护的可靠性并不受影响, 而灵敏性可能会因此降低。考虑线路 Line-1 上发生单极接地故障并携带信噪比为 30 dB 噪声的故障场景, 记录波形信息如图 14 所示。

表 7 保护性能验证

Table 7 Action of protection

故障位置	过渡电阻/ Ω	相关系数计算结果				保护动作情况
		ρ_{same1}	ρ_{same2}	ρ_{diff1}	ρ_{diff2}	
0%	0	0.793 9	0.632 1	-0.686 7	0.902 3	动作
	100	0.872 8	0.621 8	0.781 2	0.345 6	动作
	300	0.571 9	0.562 3	0.324 5	-0.471 8	动作
10%	0	0.901 2	0.897 2	-0.876 1	-0.901 7	动作
	100	0.782 2	0.761 8	-0.789 1	-0.761 2	动作
	300	0.728 1	0.672 2	0.652 1	0.518 2	动作
20%	0	0.921 4	0.923 1	-0.921 1	-0.921 3	动作
	100	0.779 9	0.877 2	-0.732 8	-0.871 2	动作
	300	0.872 1	0.781 1	-0.618 2	-0.782 3	动作
30%	0	0.932 1	0.928 9	-0.914 2	-0.926 5	动作
	100	0.861 2	0.827 1	-0.813 1	-0.845 0	动作
	300	0.712 3	0.741 3	-0.756 1	-0.761 3	动作
50%	0	1.000	1.000	-0.989 1	-0.977 9	动作
	100	0.999 9	0.999 8	-0.971 1	-0.965 4	动作
	300	0.974 1	0.978 1	-0.971 5	-0.985 4	动作
70%	0	0.931 2	0.962 2	-0.892 1	-0.841 2	动作
	100	0.821 8	0.821 3	-0.835 5	-0.723 6	动作
	300	0.821 3	0.723 2	-0.721 3	-0.632 8	动作
80%	0	0.912 3	0.912 5	-0.935 4	-0.892 1	动作
	100	0.832 7	0.821 7	-0.723 6	-0.612 3	动作
	300	0.718 3	0.837 2	-0.827 1	-0.893 2	动作
90%	0	0.892 1	0.905 4	-0.893 1	-0.871 2	动作
	100	0.823 7	0.873 9	-0.912 3	-0.954 8	动作
	300	0.918 3	0.823 9	-0.771 2	-0.832 8	动作
100%	0	0.789 1	0.678 9	-0.871 6	-0.798 4	动作
	100	0.421 8	0.388 0	-0.891 1	-0.561 8	动作
	300	0.523 1	0.892 1	0.781 2	-0.631 2	动作

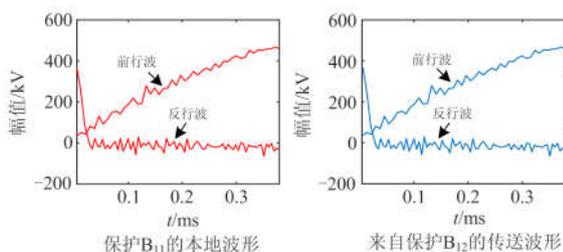


图 14 考虑噪声干扰下区内故障保护的行波波形

Fig. 14 Traveling wave of internal fault protection considering noise interference

将截取的波形分组求取相关系数, 计算结果为

$$\rho_{\text{same1}} = 0.6413 \quad \rho_{\text{same2}} = 0.6378$$

$$\rho_{\text{diff1}} = -0.5989 \quad \rho_{\text{diff2}} = -0.6119$$

可见, 波形信息中混叠 30 dB 的强噪声干扰后, 行波之间的相关性下降比较大。即使如此, 其结果仍然高于阈值 $k(0.24)$, 表明保护的判断拥有较大的裕度和良好的抗噪能力。

3) 采样率对保护的影响

在固定的数据窗长内, 更高采样率下获取的采样点更为密集, 能减少行波信息点之间的错位误差。因此, 提高采样率可使行波之间的相关系数计算结果更贴近于真实情况, 有利于保护的精度及性能的提升。由式(17)可知, 本文采样率的可行下限为 65 kHz, 故以 65 kHz 为起点, 逐步提高采样率来考察保护性能。研究对象为 Line-1 首端保护 B_{11} , 改变故障位置和过渡电阻, 保护性能的变化如图 15 所示。

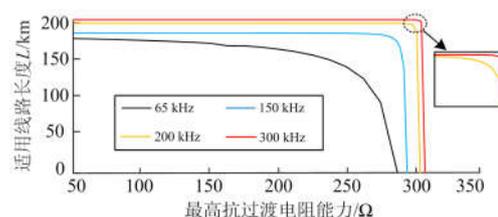


图 15 采样率与保护性能的关系

Fig. 15 Relationship between sampling rate and protection

可见, 采样率从 65 kHz 提高 200 kHz 时, 保护的能有明显提升; 但对比 200 kHz 和 300 kHz 两种工况, 保护性能的变化十分有限。并且, 200 kHz 采样率下保护已能完全对 200 km 线路长度和 300 Ω 过渡电阻的故障进行覆盖, 结合本文模型的参数, 200 kHz 采样率已是满足要求的合适选择。

5 结论

为解决多端柔性直流系统的线路保护问题, 本文提出一种基于相关系数的多端柔性直流输电系统纵联保护方案。其中, 本方案利用行波突变量能量设计相应的启动判据, 实现对环网系统对侧线路故障的有效排除; 并且利用故障后各保护处的前行波、反行波的特征差异, 基于相关系数设计相应的动作判据, 实现对故障的识别与隔离。

本文所提出的方案具有以下优点:

1) 无需在线路两侧加装直流电抗器构造边界, 不会额外增加系统成本。同时, 该方案仅利用多端柔性直流系统的自身结构特征设计保护方案, 对系统稳定运行无影响。

2) 在区外故障场景下, 在较为严重的故障发生时, 本保护方案依旧能够可靠制动, 保证直流线路的安全稳定运行, 实现保护的选择性。

3) 在区内故障场景下, 能够可靠识别并隔离极间故障与单极接地故障, 且具有较强的抗过渡电阻能力, 近区故障时保护依旧能正确动作。

4) 各保护仅需要发送故障行波到达后的行波信息图至线路对侧, 无需数据同步, 动作速度最快为 2 ms, 具有较好的速动性。

参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [3] 李岩, 罗雨, 许树楷, 等. 柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 7-13.
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [4] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Southern Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.
- [5] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [6] 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.
- [7] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-167.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167.
- [8] 郭铸, 刘涛, 陈名, 等. 南澳多端柔性直流工程线路故障隔离策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 41-46.
GUO Zhu, LIU Tao, CHEN Ming, et al. Isolation strategy for line fault of Nan'ao Multi-Terminal VSC-HVDC Project[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 41-46.
- [9] 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, 2015, 36(22): 1-7.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 36(22): 1-7.
- [10] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3833.
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3833.
- [11] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [12] TONG Ning, LIN Xiangning, LI Yan, et al. Local measurement-based ultra-high-speed main protection for long distance VSC-MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 353-364.
- [13] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
- [14] 李振兴, 谭洪, 叶诗韵, 等. 特高压直流线路保护研究现状分析[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 184-189.
LI Zhenxing, TAN Hong, YE Shiyun, et al. Current status analysis on protection of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 184-189.
- [15] 刘剑, 范春菊, 邵能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection

- and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [16] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [17] 田培涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-8.
TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-8.
- [18] ZHANG X, TAI N, WANG Y, et al. EMTR-based fault location for DC line in VSC-MTDC system using high-frequency currents[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(10): 2499-2507.
- [19] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于暂态电流 Pearson 相关性的两电平 VSC-HVDC 直流线路故障判别[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 74-85.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for two-level VSC-HVDC DC line based on Pearson correlation of transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 74-85.
- [20] TONG Ning, LIN Xiangning, LI Yan, et al. Local measurement based ultra-high-speed main protection for long distance VSC-MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 353-364.
- [21] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [22] 郑艳艳, 朱永利, 刘童童, 等. 基于零序电流的风电场单相接地故障区段定位[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1408-1415.
ZHENG Yanyan, ZHU Yongli, LIU Tongtong, et al. Single-phase grounding fault location in wind farm based on zero-sequence current[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1408-1415.
- [23] 甄永赞, 杨荆宜, 张冰. 基于小波变换的直流线路行波保护采样数值稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 42-48.
ZHEN Yongzan, YANG Jingyi, ZHANG Bing. Study on numerical sampling stability of traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 42-48.
- [24] HAN Y, TANG L, LI L, et al. Influence of lightning flashover criterion on the calculated lightning withstand level of ± 800 kV UHVDC transmission lines at high altitude[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(1): 185-191.
- [25] 李爱民, 徐敏, 蔡泽祥, 等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 90-96.
LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
- [26] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [27] 宋国兵, 李德坤, 靳东晖, 等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 83-88.
SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.

收稿日期: 2019-08-03; 修回日期: 2019-10-09

作者简介:

林湘宁(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和新能源微电网规划;

刘琦(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: liuqi804250283@qq.com

童宁(1988—), 男, 通信作者, 博士后, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: tony1109@qq.com

(编辑 魏小丽)