

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240500

兼顾短路与断线故障识别的柔性直流电网行波保护方案

沈毅, 黄琛, 赵振廷, 李银红

(强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 目前大多数柔性直流电网行波保护在配置时仅考虑短路故障, 当发生断线故障时, 保护动作的正确性尚不明确。对此, 首先分析了断线故障下传统行波保护的動作特性, 得出了传统行波保护无法正确识别短路与断线故障的结论。在此基础上, 探索了断线与短路故障下线路受端的第二个电流波头特征和线路电压特征, 研究了两种故障下线路送端的电流首行波特征以及两端电压与电流变化量乘积的特征, 提出了一种兼顾短路与断线故障识别的行波保护方案。基于PSCAD/EMTDC仿真平台对所提保护方案进行了性能验证。结果表明, 该保护方案能准确识别并应对各种条件的故障, 且具有较高的速动性和抗噪声干扰能力。

关键词: 柔性直流电网; 行波保护方案; 短路故障; 断线故障; 电流行波

A traveling wave protection scheme for flexible DC power grids considering both short-circuit and breakage fault identification

SHEN Yi, HUANG Chen, ZHAO Zhenting, LI Yinhong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Currently, most traveling wave protection of flexible DC power grids only considers short-circuit faults when configured. When breakage faults occur, the correctness of protection actions is unclear. In response to this problem, the action characteristics of traditional traveling wave protection under breakage faults are first analyzed. It is concluded that traditional traveling wave protection cannot correctly identify short-circuit and breakage faults. Thus, the second current traveling wave front characteristics and line voltage characteristics at the receiving end of the line under breakage and short-circuit faults are explored. The first current traveling wave characteristics at the sending end of the line and the characteristics of the product of voltage and current changes at both ends under the two kinds of faults are studied. A traveling wave protection scheme considering both short-circuit and breakage fault identification is proposed. The performance of the proposed protection scheme is verified on the PSCAD/EMTDC simulation platform. The results show that the protection scheme can accurately recognize and cope with faults of various conditions and has high speed and resistance to noise interference.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207107).

Key words: flexible DC power grid; traveling wave protection scheme; short-circuit fault; breakage fault; current traveling wave

0 引言

近年来, 柔性直流电网引起了工业界和学术界的广泛关注。由于其具有灵活可控的运行方式及多电源供电、多落点受电等优势, 被认为是新能源基地远距离外送并网的有效解决方案^[1-4]。目前, 国内

已有数个已投运或规划中的柔性直流电网工程^[5]。然而, 柔性直流电网多采用架空输电线路进行功率传输, 其工作环境恶劣, 极易发生各种类型的故障, 给系统的安全可靠运行带来极大风险^[6-8]。因此, 需要设计合理的保护策略。

柔性直流电网的线路故障主要有两类: 短路故障和断线故障。由于短路故障的电流上升速度快、幅值大, 目前柔性直流电网主要采用速动性较高的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207107)

行波保护作为各种短路故障的主保护^[9]。为进一步提升行波保护性能,国内外学者进行了大量研究,如提出基于分段电压变化量的判据以提升保护在弱边界电网中的适用性^[10]、利用首行波主频分量的衰减特征提升保护的耐过渡电阻能力^[11]、将电压与电流的变化率分别设为主保护和后备保护判据以提升保护的抗噪声干扰能力^[12]等。

工程中的断线故障通常由环境污染导致钢芯腐蚀、安装质量不合格、雷击等因素引起^[13]。文献[14]针对海上风电直流输电系统,提出了一种将闭锁换流器与断开直流开关相互配合的断线保护策略。文献[15]针对四端直流配电系统,提出了一种基于单端正负极电流和差比的断线保护。文献[16]针对双极金属回线系统,提出了一种基于改进相模变换方法的断线故障保护。

对于短路或断线故障,柔性直流电网应采取不同的应对策略。当直流线路发生短路故障时,须快速跳开直流断路器以隔离故障。而且,由于短路故障多为瞬时性故障,断路器跳开后需再次重合以提高运行可靠性^[17]。当直流线路发生断线故障时,由于故障线路无冲击电流,直流断路器无须跳闸,可将控制策略调整为单极运行下的策略以减小对系统的影响^[18]。但如果发生断线故障后,保护判据无法在短时间内判断出是短路故障还是断线故障,则仍须快速跳开直流断路器以确保系统安全。此时,由于断线故障为永久性故障,断路器跳开后无需再次重合^[19]。因此,这就要求保护在短路和断线故障的各种情况下均能采取最合理的应对措施,从而减少不必要的断路器操作(如在断线故障下跳闸、重合于永久性断线故障等),延长断路器使用寿命。然而,目前大多数保护配置时仅考虑短路故障,断线故障下保护动作的正确性尚不明确。尤其是行波保护,作为柔性直流电网的主保护,其动作速度快于其他保护。若其能正确区分短路和断线故障,则可帮助整个柔性直流电网更准确地应对不同类型的故障。

针对上述问题,本文提出了一种兼顾短路与断线故障识别的柔性直流电网行波保护方案。首先从断线和短路故障的波过程出发,阐述了断线故障下受端和送端传统行波保护的動作特性,发现传统行波保护无法正确识别短路与断线故障。接着针对线路受端和送端保护,分别探索了断线和短路故障的特性,提出了相应的故障类型识别判据,以及新的保护方向判据,从而形成了完整的行波保护方案。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台对所提保护方案进行了验证,结果表明,该方案在各种故障条件下均能准确识别,且有较高的速动性和抗噪声干扰能力。

1 断线故障下传统行波保护的動作特性

1.1 传统行波保护的動作方程

传统行波保护利用电流变化量识别正反向故障、利用电压变化率识别区内故障、利用正负极电压变化量比值进行故障选极^[20-21],正极线路保护動作方程表示为

$$\begin{cases} \Delta i_a > (\Delta i_a)_{\text{set}} \\ \left| \frac{du_a}{dt} \right| > \left(\frac{du_a}{dt} \right)_{\text{set}} \\ \left| \frac{\Delta u_a}{\Delta u_b} \right| > \left(\frac{\Delta u_a}{\Delta u_b} \right)_{\text{set}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δi_a 为正极直流电流变化量; du_a/dt 为正极直流电压变化率; Δu_a 和 Δu_b 分别为正极和负极直流电压变化量; 下标“set”表示整定值。

本文以正极线路 mn 为例进行分析,如图 1 所示,其中 f 为故障点, u_{ma} 、 i_{ma} 和 u_{na} 、 i_{na} 分别为 m 端和 n 端的测量电压与测量电流, u_{fm} 、 i_{fm} 和 u_{fn} 、 i_{fn} 分别为故障点两侧的电圧与电流,各电流参考正方向均在图中标出。正常运行时,线路功率流向为 n 端(送端)流向 m 端(受端)。设正常运行时线路电流为 $I_{\text{brk}} > 0$ (方向与潮流方向相同),则根据图 1 中所标的电流正方向,正常运行时 $i_{fm} = -I_{\text{brk}}$ 、 $i_{fn} = I_{\text{brk}}$ 。

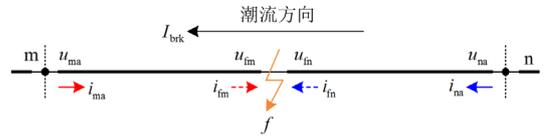


图 1 正极线路 mn

Fig. 1 Positive line mn

1.2 受端(m 端)保护的動作特性

当发生区内断线故障 f_{brk} 后,如图 2(a)所示,故障点 f 处的电流立即降为 0,因此,断线后故障点向 m、n 端发出的电流首行波 I_{fm} 、 I_{fn} 分别为

$$\begin{cases} I_{fm} = 0 - (-I_{\text{brk}}) = I_{\text{brk}} > 0 \\ I_{fn} = 0 - I_{\text{brk}} = -I_{\text{brk}} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

由于 I_{fm} 的传播方向与电流 i_{fm} 正方向相反,属于反行波,因此故障点向 m 端发出的电压首行波 U_{fm} 也属于反行波,并满足如式(3)。

$$U_{fm} = -Z_c I_{fm} = -Z_c I_{\text{brk}} = -U_{\text{brk}} < 0 \quad (3)$$

式中: Z_c 为线路波阻抗; U_{brk} 为电压首行波的幅值。因此,断线故障后受端测得的电流首行波 $I_{ma} > 0$,电压首行波 $U_{ma} < 0$,这与区内短路故障的行波特征相同^[22],如图 2(b)和图 2(c)所示(其中 I_{sc} 为金属性短

路故障下故障点处的电流首行波)。因此, 区内断线故障将会被受端的传统行波保护误判为区内短路故障。

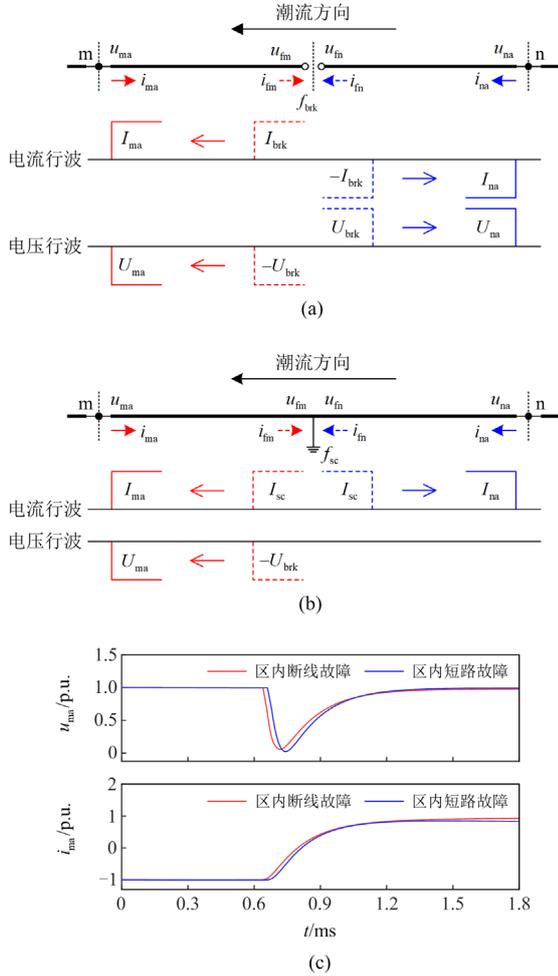


图 2 m 端首行波对比

Fig. 2 Comparison of the first travelling wave at the m-end

1.3 送端(n 端)保护的動作特性

根据图 2(a), 区内断线故障下 n 端测得的电流首行波 $I_{na} < 0$, 这与反向短路故障的特征相同, 如图 3(a)和图 3(b)所示。因此, 根据式(1)中的电流变化量判据, 区内断线故障将会被送端的传统行波保护误判为反向短路故障。

综上, 对于正极线路, 当发生区内断线故障时, 受端传统行波保护会将其误判为区内短路故障, 送端传统行波保护会将其误判为反向短路故障。对于负极线路故障, 由对称性可推出各故障行波分别与图 2、图 3 中对应的行波极性相反, 负极线路的传统行波保护在负极动作方程下同样会将区内断线故障误判, 误判结果与正极相同。这将影响柔性直流电网对不同类型故障的快速正确应对。接下来的第

2 节和第 3 节中, 将分别对断线与短路故障下受端和送端保护的行波特征展开研究, 为研究兼顾短路与断线故障识别的行波保护方案提供理论依据。

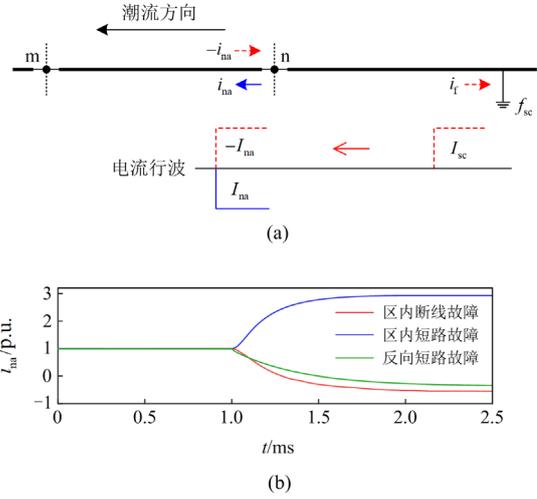


图 3 n 端首行波对比

Fig. 3 Comparison of the first travelling wave at the n-end

2 断线与短路故障下受端的行波特征

2.1 故障点处的电流反射系数

正极线路断线故障的相域示意图如图 4(a)所示。其中, ΔU_{Fa} 、 ΔU_{Fb} 、 I_{fa} 、 I_{fb} 分别为正、负极故障端口的电压和电流, 电流正方向为送端(n 端)流向受端(m 端); U_1 、 U_2 为等值电源($U_1 < U_2$)。经过相模变换后可以得到相互独立的一模、零模网络, 如图 4(b)所示。根据图 4(a)可列出正极断线故障的边界条件为

$$\begin{cases} \Delta U_{Fb} = 0 \\ I_{fa} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

通过相模变换, 可以得到模域中的边界条件为

$$\begin{cases} \Delta U_{Fa0} - \Delta U_{Fa1} = 0 \\ I_{fa0} + I_{fa1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, ΔU_{Fa0} 、 ΔU_{Fa1} 、 I_{fa0} 、 I_{fa1} 分别为 ΔU_{Fa} 、 I_{fa} 经相模变换得到的零模和一模分量。

根据式(5), 可以得到正极断线故障下一模、零模网络的连接关系与彼得生电路, 如图 4(c)所示。以一模分量为例进行分析, 由图 4(c)可得正极断线故障点处的电流反射系数 β_b 为

$$\beta_b = -\frac{Z_{C0} - Z_{C1}}{Z_{C0} + Z_{C1}} < 0 \quad (6)$$

式中, Z_{C0} 和 Z_{C1} 分别为零模和一模线路的波阻抗。

当线路发生双极断线故障时, 同理可得故障点处的电流反射系数 β_b 为

$$\beta_{fb} = -1 < 0 \quad (7)$$

当线路发生短路故障时^[23], 对于单极接地故障, 有

$$\begin{cases} \beta_{fsr} = \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C0} + 4R_f} > 0 \\ \beta_{fs} = \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + Z_{C0}} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

对于双极短路故障, 有

$$\begin{cases} \beta_{fsr} = \frac{Z_{C1}}{Z_{C1} + R_f} > 0 \\ \beta_{fs} = 1 > 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, β_{fsr} 、 β_{fs} 分别为经过渡电阻 R_f 短路和金属性短路下故障点的电流反射系数。对比发现, 断线故障点的电流反射系数小于 0, 而短路故障点的电流反射系数大于 0。

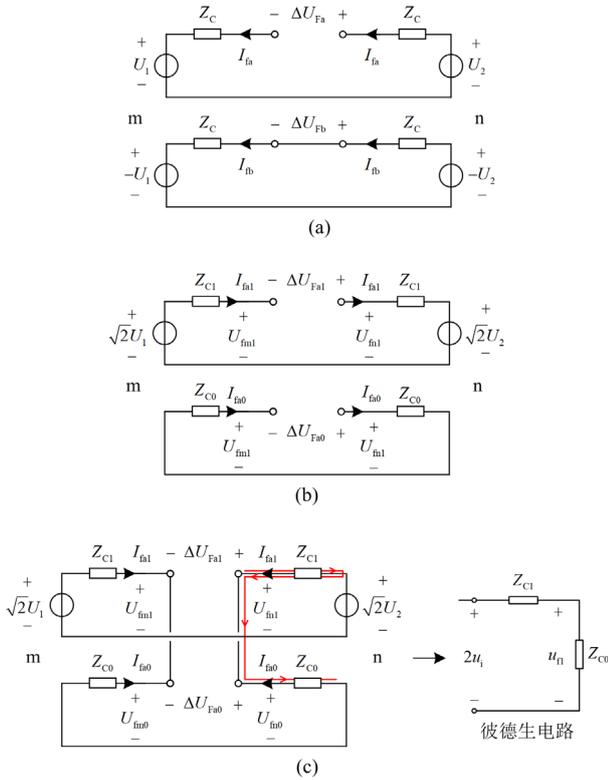


图 4 正极断线故障示意图

Fig. 4 Schematic diagram of positive pole breakage fault

2.2 受端第二个电流波头特征

根据 1.2 节的分析, 断线与短路故障的受端电压、电流首行波特性相同, 因此, 仅凭首行波难以对二者进行甄别。本节将探讨断线与短路故障下 m 端测得的第二个电流行波的波头特征, 即“第二个电流波头^[24-25]”的特征。

断线和短路故障后的电流行波网络图如图 5 所示, 其中 CB 为直流断路器, x 表示故障点到保护 P1 的距离。线路终端处的电流反射系数 β_{ii} 的表达式为^[23]

$$0 < \beta_{ii} = \frac{2Z_{C1}}{Z_L + Z_M Z_L / (Z_M + Z_L)} - 1 < 1 \quad (10)$$

式中: Z_M 为 MMC 换流站的等值阻抗, $Z_M = R_M + sL_M + 1/(sC_M)$, R_M 、 L_M 和 C_M 分别为换流站简化模型中的等值电阻、等值电感和等值电容^[26]; Z_L 为邻接线路的等值阻抗, $Z_L = Z_{C1} + sL_{dc}$, 其中 L_{dc} 为线路两端的限流电感。因此, 根据式(10)得到 m 端的电流反射系数 $\beta_{mi} > 0$ 。

当线路发生故障后, m 端的第二个电流波头可能来自本端的第二个反射波(如图 5 中的红色实线所示), 也可能来自对端的首个反射波(如图 5 中的蓝色虚线所示)。但对于正极断线故障, 由于图 4(c) 中一模线路故障点左右两侧并未直接相连, 中间串接了零模线路, 因此, 行波传至一模线路故障点时不会进入另外一侧的一模线路, 而是进入本侧零模线路, 如图 4(c) 中的红线所示; 而对于双极断线故障, 由于故障点两侧无电气连接, 行波显然无法在故障点处发生折射。因此, 可认为断线故障下对端的反射波无法通过故障点折射至本端, 即无论在何处发生断线故障, m 端第二个电流波头必定来自本端的第二个反射波, 如图 5(a) 所示。

根据行波的传播过程可以得到第二个电流波头的表达式。图 5(a) 中, 断线故障后 t_{m1} 时刻首个入射波 I_{brk} 到达 m 端发生反射, 产生反射波 $\beta_{mi} I_{brk}$, t_{m2} 时刻该反射波传播至故障点处, 发生反射之后又产生第二个入射波 $\beta_{fb} \beta_{mi} I_{brk}$, 该入射波于 t_{m3} 时刻到达 m 端再次发生反射, 产生第二个反射波 $-\beta_{fb} \beta_{mi}^2 I_{brk}$, 因此, t_{m3} 时刻 m 端测得的第二个电流波头 ΔI_{b2} 为

$$\Delta I_{b2} = \beta_{fb} \beta_{mi} (1 + \beta_{mi}) I_{brk} \quad (11)$$

根据前文分析, $\beta_{fb} < 0$, $\beta_{mi} > 0$, 因此 $\Delta I_{b2} < 0$, 如图 5(d) 所示。

对于金属性短路故障, 同样可认为对端的反射波无法折射至本端^[23], 如图 5(b) 所示。故同理可得到 t_{m3} 时刻 m 端测得的第二个电流波头 ΔI_{s2} 为

$$\Delta I_{s2} = \beta_{fs} \beta_{mi} (1 + \beta_{mi}) I_{sc} \quad (12)$$

由于 $\beta_{fs} > 0$, 因此 $\Delta I_{s2} > 0$, 如图 5(e) 所示。

由此看出, 断线故障下第二个电流波头的极性为负, 金属性短路故障下第二个电流波头的极性为正。因此, 可通过第二个电流波头的极性将二者区分开来。

然而, 对于非金属性短路故障, 对端的反射波可以通过故障点折射至本端^[23], 第二个电流波头将

来自本端第二个反射波与对端首个反射波中更早到达 m 端的那个。对于近端 ($0 < x < l/2$) 非金属性短路故障, 显然本端的第二个反射波更早到达 m 端, 形成第二个电流波头, 与金属性短路故障的情况相同, 其极性为正; 而对于远端 ($l/2 < x < l$) 非金属性短路故障, 对端的首个反射波更早到达 m 端, 形成第二个电流波头 ΔI_{sr} (对应时刻为 t'_{m3}), 如图 5(c) 所示, 其表达式为

$$\Delta I_{sr} = -\alpha_{fsr} \beta_{ni} (1 + \beta_{mi}) I_{sr} \quad (13)$$

式中: β_{ni} 为 n 端电流反射系数 ($\beta_{ni} > 0$); I_{sr} 为非金属性短路故障下故障点处的电流首行波; α_{fsr} 为金属性 R_f 短路下故障点的电流折射系数, 对于单极接地故障, 有

$$\alpha_{fsr} = \frac{Z_{C0} + 4R_f}{Z_{C1} + Z_{C0} + 4R_f} > 0 \quad (14)$$

对于双极短路故障, 有

$$\alpha_{fsr} = \frac{R_f}{Z_{C1} + R_f} > 0 \quad (15)$$

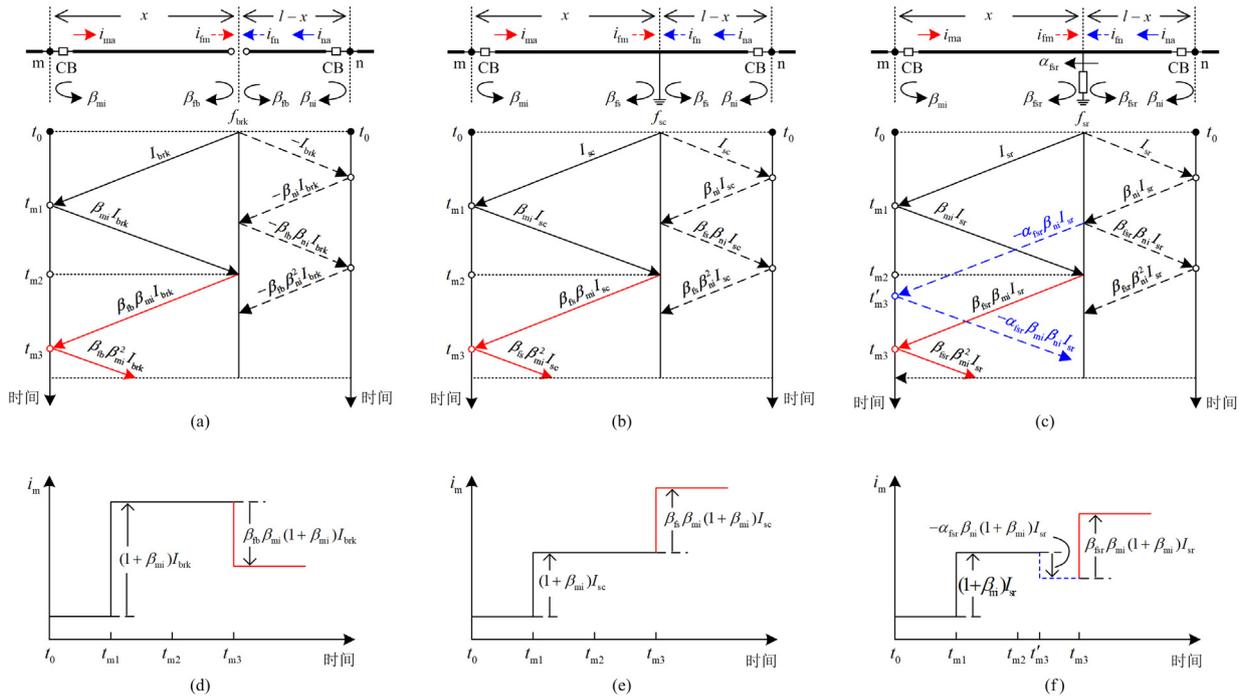


图 5 区内断线和短路故障的电流行波传播网格图

Fig. 5 Lattice diagrams of current travelling wave propagation under internal breakage and short-circuit faults

由式(13)一式(15)可知 ΔI_{sr} 极性为负, 如图 5(f) 所示, 与断线故障下的 ΔI_{b2} 相同。但过渡电阻的存在会导致 I_{sr} 大大减小, 使得 $|\Delta I_{sr}| < |\Delta I_{b2}|$ 。因此, 可通过设置合适的保护整定值来加以区分。

特别地, 当线路中点附近发生非金属性短路故障时, 由于本端第二个反射波(极性为正)与对端首个反射波(极性为负)的到达时刻十分接近, 可认为 m 端测得的第二个电流波头为二者之和, 其特征与过渡电阻 R_f 的大小有关。显然, 当 R_f 较小时, 第二个电流波头极性为正, 类似于金属性短路故障的情况; 当 R_f 较大时, 第二个电流波头极性为负, 但幅值较小。根据上文所述, 它们均可与断线故障区分开来。

综上, 对于受端保护, 尽管断线与短路故障的电压、电流首行波特性和完全相同, 但断线故障下的第二个电流波头极性为负且绝对值较大; 金属性短

路故障及近端非金属性短路故障下第二个电流波头极性为正; 远端经过渡电阻的短路故障下第二个电流波头极性为负且绝对值较小; 线路中点附近非金属性短路故障下第二个电流波头可能极性为正, 也可能极性为负且绝对值较小。因此, 可以考虑利用第二个电流波头的极性和幅值大小识别断线与短路故障。

2.3 断路器跳闸后线路电压的特征

根据图 5 可得, 第二个电流波头到来的时刻要比首行波晚 $\Delta t = t_{m3} - t_{m1}$, 但由于区内断线故障的首行波特性与区内短路故障类似, 为确保系统安全, 保护必须在首行波阶段就动作, 向直流断路器发出跳闸指令。如果直流断路器正常跳闸, 其跳闸时间为 3 ms, 跳闸过程中测量电流将迅速降为 0, 难以检测后续电流行波的到来, 此时无法获取第二个电流波头的特征来区分断线与短路故障, 从而无法确

定是否需要重合闸。但断路器跳闸后需等待 100~200 ms 的去游离时间才能进行重合闸^[27], 因此, 可利用跳闸后较长时间内的测量数据进行识别。

对于断线故障, 图 5(a)中 m 端断路器跳闸后, m 端与故障点之间的线路两端均悬空, 线路储存的能量只能通过线路对地电容进行释放, 因此, 断路器跳闸后的一段时间内线路 m 端电压将维持在较高的水平; 对于短路故障, 图 5(b)中 m 端断路器跳闸后, 由于故障点处于接地状态, 因此, m 端与故障点之间线路储存的能量将通过故障点进行释放, 线路 m 端电压迅速下降为 0。因此, 断路器跳闸后可以利用这一特性来区分断线与短路故障, 进而确定重合闸策略。

如果直流断路器失灵拒动, 则可正常检测到后续的电流行波, 此时可以用第二个电流波头的特性区分断线与短路故障。若识别为短路故障, 则应由相邻线路上的后备保护断开对应的直流断路器来隔离故障^[28]; 若识别为断线故障, 则只需调整控制策略即可, 无需断开其他断路器。

3 断线与短路故障下送端的行波特征

3.1 正反向断线与短路故障的行波特征

根据 1.3 节的分析, 区内断线故障与反向短路故障下送端的电流首行波均小于 0, 因此, 对于送端的传统行波保护, 其方向判据无法准确区分反向短路与正向断线故障, 需要研究新的方向判据。为了兼顾短路与断线故障的正确识别, 并且简化保护的实现逻辑, 新方向判据应同时具备对正反向短路故障以及正反向断线故障的判别能力, 即正向短路和正向断线故障下判据均满足、反向短路和反向断线故障下判据均不满足。

文献[29]发现电压变化量与电流变化量的乘积 $\Delta U \cdot \Delta I$ 可用于区分正反向短路故障, 正向短路故障下 $\Delta U \cdot \Delta I < 0$, 反向短路故障下 $\Delta U \cdot \Delta I > 0$, 即可采用 $\Delta U \cdot \Delta I < 0$ 作为正反向短路故障的方向判据。下面对于送端保护, 探讨正反向断线故障下该判据的有效性。

图 2(a)中, 故障点向送端(n 端)发出的电流首行波 I_n 的传播方向与电流 i_n 正方向相反, 同样属于反行波, 因此, 故障点向 n 端发出的电压首行波 U_n 也属于反行波, 可得到

$$U_n = U_{brk} > 0 \quad (16)$$

因此, 由图 2(a)可以看出, 正向区内断线故障下送端行波也满足 $\Delta U \cdot \Delta I < 0$ 。故对于送端保护, 正向短路和正向断线故障下判据均满足。

反向断线故障下本端测得的电压、电流首行波极性仅与背侧线路的潮流方向有关。对于 n 端保护, n' 端为背侧线路与 n 端相邻的端点。若 n' 端为受端, 如图 6(a)所示, 根据 1.2 节的分析, 故障点将向 n' 端发出正电流行波 I_{brk} 和负电压行波 $-U_{brk}$, 到达 n' 端形成正电流行波 I'_n 和负电压行波 $-U'_n$, 经过折射(电压、电流折射系数均为 $\alpha_n > 0$ ^[23])得到 $\alpha_n I'_n$ 和 $-\alpha_n U'_n$ 。由于 i_n 和 i'_n 的方向相反, 因此, n 端实际测得的电流行波 $I_n = -\alpha_n I'_n$ 。可以看出, n 端测得的电压、电流行波(即图 6(a)中红色实线表示的行波)均小于 0, 因此 $\Delta U \cdot \Delta I > 0$ 。若 n' 端为送端, 如图 6(b)所示, 同理可得 n 端测得的电压、电流行波(即图 6(b)中红色实线表示的行波)均大于 0, 因此 $\Delta U \cdot \Delta I > 0$ 。故对于送端保护, 反向短路和反向断线故障下判据均不满足。

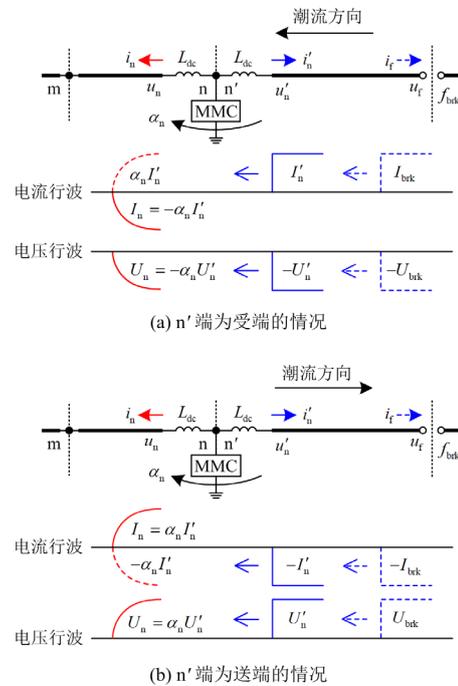


图 6 区外断线故障下 n 端电压、电流首行波情况
Fig. 6 First voltage and current travelling waves at the n-end under external breakage faults

此外, 分析发现该判据同样适用于受端保护。表 1 中列出了正反向短路和断线故障下线路两端 ΔU 和 ΔI 的正负性。可以看出, 无论是正向短路故障还是断线故障, 两端均有 $\Delta U \cdot \Delta I < 0$; 无论是反向短路故障还是断线故障, 两端均有 $\Delta U \cdot \Delta I > 0$ 。因此, 其可作为两端保护的方向判据。

3.2 区内断线与短路故障的电流首行波特征

排除了反向故障后, 送端保护同样还需要识别区内断线与短路故障。根据图 2(a)和图 2(b), 区内

断线故障下 n 端测得的电流首行波 $I_{na} < 0$, 而区内短路故障下 n 端测得的电流首行波 $I_{na} > 0$, 即两者的电流首行波极性不同。因此, 送端保护可利用电流首行波的极性来区分短路与断线故障。

表 1 正反向故障下 ΔU 和 ΔI 的正负性

Table 1 Signs of ΔU and ΔI under forward and backward faults

	正向	反向	正向断线		反向断线	
	短路	短路	受端	送端	背侧为受端	背侧为送端
ΔU	-	-	-	+	-	+
ΔI	+	-	+	-	-	+
$\Delta U \cdot \Delta I$	-	+	-	-	+	+

4 兼顾短路与断线故障识别的行波保护方案

基于前述分析, 本文提出了一种兼顾短路与断线故障识别的行波保护方案。以正极线路 mn 两端的保护为例, 保护方案流程图如图 7 所示。

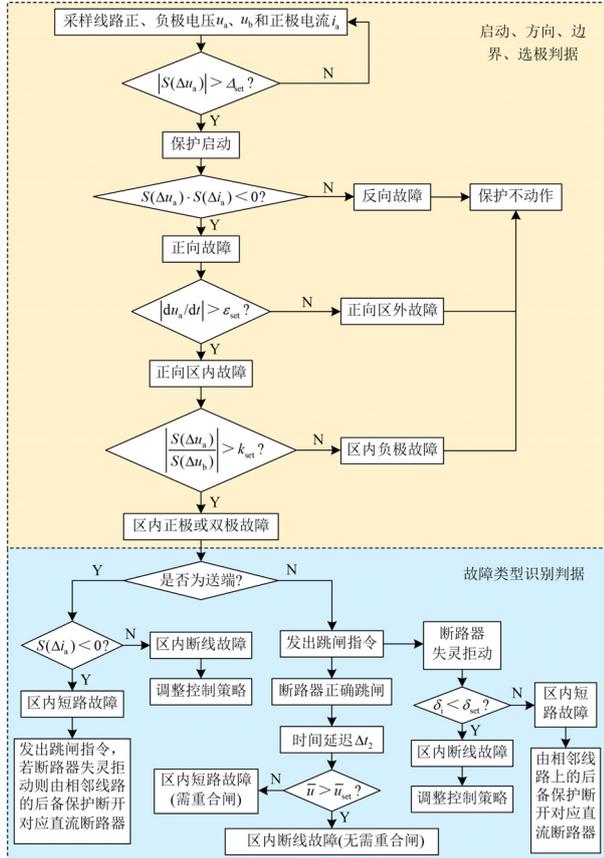


图 7 保护方案流程图

Fig. 7 Flow chart of protection scheme

4.1 保护启动、方向、边界与选极判据

故障首行波到达线路终端时, 端口电压将发生显著变化, 可根据该现象设置保护的启动判据。为避免噪声引起的保护误动, 可选用线路端口电压变化

量积分的绝对值作为检测故障发生的特征量^[30], 判据如式(17)所示。

$$|S(\Delta u_a)| = \left| \int \Delta u_a dt \right| > \Delta_{set} \quad (17)$$

式中: Δu_a 为线路端口电压变化量, 其积分简记为 $S(\Delta u_a)$; Δ_{set} 为该判据的整定值。

根据 3.1 节的分析, 正反向故障可利用端口电压、电流变化量的乘积来判别。为避免噪声影响, 方向判据同样采用积分形式表示为

$$S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0 \quad (18)$$

直流输电线路终端装有限流电抗器, 当发生正向区外故障后, 故障行波从区外线路进入本段线路时其波头变得平缓。因此, 可采用电压变化率的绝对值来识别区内外故障, 判据如式(19)所示。

$$\left| \frac{du_a}{dt} \right| > \varepsilon_{set} \quad (19)$$

式中, ε_{set} 为该判据的整定值。

此外, 对于双极输电系统, 需要进行故障选极以确保非故障极的功率正常传输。故障选极判据为

$$\left| \frac{S(\Delta u_a)}{S(\Delta u_b)} \right| > k_{set} \quad (20)$$

式中, k_{set} 为该判据的整定值。

4.2 故障类型识别判据

根据 3.2 节的分析, 区内断线故障和区内短路故障下线路送端测得的电流首行波极性不同, 因此, 送端保护可利用电流首行波变化量积分的正负性来识别断线故障, 判据如式(21)所示。

$$S(\Delta i_a) < 0 \quad (21)$$

根据第 2 节的分析, 区内断线故障和区内短路故障下线路受端测得的电压、电流首行波特性相同, 因此, 当受端保护判断满足式(17)—式(20)时, 应向直流断路器发出跳闸指令。如果直流断路器正常跳闸, 则可利用跳闸后线路终端电压水平 \bar{u} 来区分断线和区内短路故障, 判据如式(22)所示。

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_n u_a[n] > \bar{u}_{set} \quad (22)$$

式中: N 为 t_1 时刻保护发出跳闸指令后经时间延迟 Δt_1 的时间窗 T_1 内采样点个数, 即 $(t_1 + \Delta t_1) \sim (t_1 + \Delta t_1 + T_1)$ 内的采样点个数, Δt_1 为断路器所需的跳闸时间; n 为采样点序号; $u_a[n]$ 为端口电压采样瞬时值; \bar{u}_{set} 为该判据的整定值。

若直流断路器失灵拒动, 则可利用第二个电流波头的特性来区分断线与短路故障, 判据如式(23)所示。

$$\delta_i = I_{\min 2} - I_{\max 1} < \delta_{\text{set}} \quad (23)$$

式中： $I_{\max 1}$ 为首行波阶段受端测量电流的最大值(对应的时刻为 t_2)； $I_{\min 2}$ 为 t_2 时刻后时间窗 T_2 内受端测量电流的最小值，即 $t_2 \sim (t_2 + T_2)$ 内测量电流的最小值； $I_{\min 2}$ 与 $I_{\max 1}$ 之差用 δ_i 表示； δ_{set} 为该判据的整定值。

5 仿真验证

5.1 仿真模型搭建及保护配置

在PSCAD/EMTDC中建立了一个 ± 400 kV四端双极柔性直流电网的模型，如图8所示。换流站 S_1 、 S_3 和 S_4 采用定有功功率控制，其有功功率控制目标分别为-1500、800、1200 MW，换流站 S_2 采用定电压控制，线路 $Lmn(m, n = 1, 2, 3, 4)$ 采用架空线结构。换流站详细参数和架空线结构详见文献[21]。线路两端限流电感 $L_{dc} = 50$ mH，保护采样频率为50 kHz。 f_{12} 、 f_{14} 和 f_{23} 分别为线路L12、L14和L23上的故障， f_1 和 f_2 分别为母线1、2上的故障， f_{s1} 和 f_{s2} 分别为换流站 S_1 和 S_2 的交流侧故障，各故障发生时刻均设为3 s。

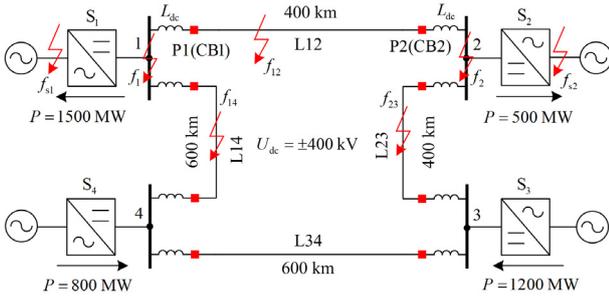


图8 四端MMC-HVDC仿真模型

Fig. 8 Four terminal MMC-HVDC simulation model

本节以正极线路L12两端的保护P1、P2为例，对所提保护方案的性能进行评估，对应的断路器CB1和CB2均采用混合式直流断路器结构，额定运行时P1侧为受端，P2侧为送端。为方便描述，本节利用式(24)进行故障类型的标注。

$$f_{a-b} |(x, R_f) \quad (24)$$

式中： a 表示故障位置； b 表示故障类型； R_f 表示过渡电阻。根据系统的基本结构和保护配置，设置相关判据整定值及时间参数如表2所示。

5.2 故障方向判据有效性验证

为验证故障方向判据 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0$ 的有效性，本节在L14、L23近端和L12中点分别设置了正极接地故障 $f_{14\text{-pptg}} |(20 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{23\text{-pptg}} |(420 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{12\text{-pptg}} |(200 \text{ km}, 0 \Omega)$ 和正极断线故障 $f_{14\text{-pbrk}} |(20 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{23\text{-pbrk}} |(420 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{12\text{-pbrk}} |(200 \text{ km}, 0 \Omega)$ 。各故障下保护P1、P2测量结果如表3所示。

表2 各保护判据整定值及相关时间参数

Table 2 Setting values and time parameters of protection criteria

判据	整定值及相关时间参数
$ S(\Delta u_a) > \Delta_{\text{set}}$	$\Delta_{\text{set}} = 40 \text{ kV}$
$ du_a/dt > \varepsilon_{\text{set}}$	$\varepsilon_{\text{set}} = 1800 \text{ kV/ms}$
$ S(\Delta u_a)/S(\Delta u_b) > k_{\text{set}}$	$k_{\text{set}} = 0.9$
$\bar{u} > \bar{u}_{\text{set}}$	$\bar{u}_{\text{set}} = 200 \text{ kV}, \Delta t_1 = 3 \text{ ms}, T_1 = 50 \text{ ms}$
$\delta_i < \delta_{\text{set}}$	$\delta_{\text{set}} = -0.8 \text{ kA}, T_2 = 0.8 \text{ ms}$

(20 km, 0 Ω)、 $f_{23\text{-pbrk}} |(420 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{12\text{-pbrk}} |(200 \text{ km}, 0 \Omega)$ 。各故障下保护P1、P2测量结果如表3所示。

表3 P1、P2测得的 $S(\Delta u_a)$ 和 $S(\Delta i_a)$

Table 3 $S(\Delta u_a)$ and $S(\Delta i_a)$ measured by P1 and P2

故障	保护	$S(\Delta u_a)/\text{kV}$	$S(\Delta i_a)/\text{kA}$	$S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a)$
$f_{14\text{-pptg}} (20 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-54.92	-0.12	+
	P2	-40.24	0.09	-
$f_{14\text{-pbrk}} (20 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-95.45	-0.22	+
	P2	-80.10	0.20	-
$f_{12\text{-pptg}} (200 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-419.91	1.53	-
	P2	-447.25	1.50	-
$f_{12\text{-pbrk}} (200 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-372.88	1.66	-
	P2	396.03	-1.66	-
$f_{23\text{-pptg}} (420 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-82.43	0.53	-
	P2	-121.14	-0.26	+
$f_{23\text{-pbrk}} (420 \text{ km}, 0 \Omega)$	P1	-166.16	0.62	-
	P2	-231.74	-0.52	+

可见，对于保护P1，反向故障 f_{14} 下 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a)$ 均大于0，正向故障 f_{12} 和 f_{23} 下 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a)$ 均小于0；对于保护P2，反向故障 f_{23} 下 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a)$ 均大于0，正向故障 f_{12} 和 f_{14} 下 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a)$ 均小于0。因此，判据 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0$ 可有效地区分正反向故障。

5.3 故障类型识别判据有效性验证

为验证故障类型识别判据的有效性，本节在线路L12上设置了正极接地故障 $f_{12\text{-pptg}} |(300 \text{ km}, 0 \Omega)$ 、 $f_{12\text{-pptg}} |(300 \text{ km}, 400 \Omega)$ 和正极断线故障 $f_{12\text{-pbrk}} |(300 \text{ km}, 0 \Omega)$ 。仿真结果表明，P1、P2测得的电压、电流首行波均满足 $|S(\Delta u_a)| > 40 \text{ kV}$ 、 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0$ 、 $|du_a/dt| > 1800 \text{ kV/ms}$ 和 $|S(\Delta u_a)/S(\Delta u_b)| > 0.9$ ，此时保护启动，并正确识别为区内正极或双极故障。

保护P2测量的电流首行波如图9(a)所示。可以看出，对于受端保护，断线故障下 $S(\Delta i_{a2}) < 0$ ，短路故障下 $S(\Delta i_{a2}) > 0$ ，因此，判据 $S(\Delta i_a) < 0$ 可帮

助受端保护有效地区分断线与短路故障。

保护 P1 测量的电流首行波如图 9(b)所示。可以看出, 对于送端保护, 断线与短路故障下均有 $S(\Delta i_{a1}) > 0$, 因此, 仅用电流首行波无法区分断线与短路故障, 保护应发出跳闸指令。若直流断路器正常跳闸, 则跳闸后的电压波形如图 9(c)所示。可以看出, 断线故障的 \bar{u} 较大, 满足判据 $\bar{u} > \bar{u}_{set}$, 断路器不会重合闸; 短路故障的 \bar{u} 降至 0 附近, 不满足判据 $\bar{u} > \bar{u}_{set}$, 断路器会重合闸。若直流断路器失灵拒动, 则保护将继续检测第二个电流波头, 如图 9(d)所示。可以看出, 断线故障的第二个电流波头极性为负且幅值较大, 满足判据 $\delta_i < \delta_{set}$, 换流站将调整控制策略; 金属性短路故障的第二个电流波头极性为正、远端非金属性短路故障的第二个电流波头极性为负但幅值较小, 不满足判据 $\delta_i < \delta_{set}$, 将由相邻线路上的后备保护断开对应的直流断路器。因此, 所提判据能有效地区分断线和短路故障。

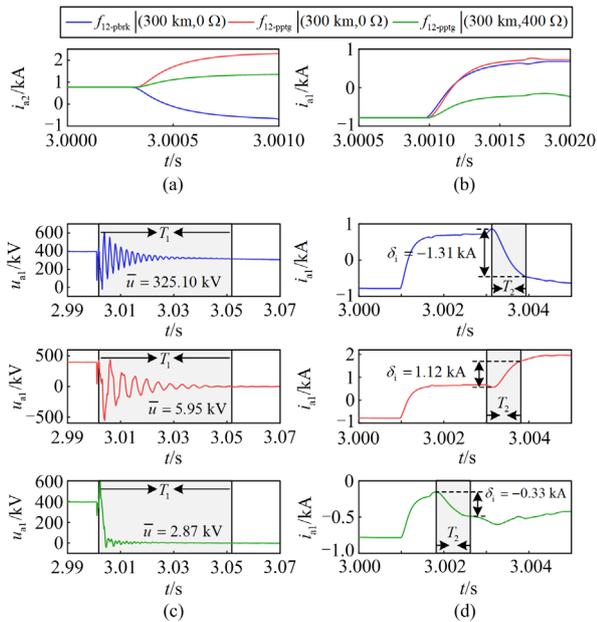


图 9 各故障下 P1、P2 测量电压和电流的波形

Fig. 9 Waveforms of voltage and current measured by P1 and P2 under various faults

5.4 保护速度验证

为验证所提保护方案的速度, 本节在线路 L12 上设置了不同条件的故障。各故障下保护 P1、P2 的故障识别所需时间如表 4 所示。

对于送端保护 P2, 由于其只需利用故障首行波即可进行故障识别, 故其所需时间较短。对于受端保护 P1, 当断路器失灵拒动时, 由于需要利用第二个电流波头的信息来识别故障, 这将导致故障识别

所需时间增加 $T_2 = 0.8\text{ ms}$, 但该情况下只能依靠相邻线路上的后备保护来隔离故障, 速动性必然会大大降低, 相比之下所增加的 T_2 延时是可接受的; 当断路器正常跳闸时, 故障识别所需时间普遍在 50 ms 以上, 但此时故障已被隔离, 仅需确定重合闸策略, 且断路器至少需经过 100~200 ms 的去游离时间才可重合闸, 因此, 故障识别所需时间能够满足要求。

表 4 各故障下 P1、P2 的故障识别所需时间

Table 4 Time required by fault identification of P1 and P2 under various faults

故障条件	断路器是否正常跳闸	保护 P1	保护 P2
$f_{12-ppgl}(100\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	53.66 ms	2.14 ms
	否	1.46 ms	
$f_{12-ppgl}(300\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	55.14 ms	0.66 ms
	否	2.94 ms	
$f_{12-ppgl}(100\text{ km}, 300\ \Omega)$	是	53.66 ms	2.14 ms
	否	1.46 ms	
$f_{12-ppgl}(300\text{ km}, 300\ \Omega)$	是	55.14 ms	0.66 ms
	否	2.94 ms	
$f_{12-pbrk}(100\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	53.64 ms	2.12 ms
	否	1.44 ms	
$f_{12-pbrk}(300\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	55.12 ms	0.64 ms
	否	2.92 ms	
$f_{12-pip}(200\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	54.28 ms	1.28 ms
	否	2.08 ms	
$f_{12-pnbrk}(200\text{ km}, 0\ \Omega)$	是	54.32 ms	1.32 ms
	否	2.12 ms	

由此看出, 所提保护方案具有良好的速动性。

5.5 保护运行准确性验证

为全面验证保护的选择性和灵敏性, 本文对不同故障条件下的故障识别与应对情况进行验证, 送端、受端保护的识别结果如表 5、表 6 所示, 其中故障距离均为故障点到 P1 的距离。

当发生各种类型的反向和正向区外故障时, 两端保护均能通过方向判据 $S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0$ 和边界判据 $|du_a/dt| > \varepsilon_{set}$ 准确识别并排除。当发生区内故障时, 送端保护 P2 能利用判据 $S(\Delta i_{a2}) < 0$ 有效识别各种类型的断线和短路故障, 从而采取对应的应对策略。受端保护 P1 无法仅通过首行波识别, 因此均发出跳闸指令, 若断路器正常跳闸则能利用判据 $\bar{u} > \bar{u}_{set}$ 有效识别各种断线和短路故障, 从而确定是否重合闸; 若断路器失灵拒动则能利用判据 $\delta_i < \delta_{set}$ 有效识别各种断线和短路故障, 从而确定应调整控制策略还是由相邻线路上的后备保护断开对应的直流断路器。对于交流侧故障, 由于其对直流电网造成的波动很小, 因此保护不启动。

此外, 从表 6 中可以看出, 当线路中点附近发

生非金属性短路故障且断路器失灵拒动时，由于保护测得的第二个电流波头为本端第二个反射波与对端首个反射波之和，其极性与过渡电阻大小有关，但幅值均较小，不满足判据 $\delta_i < \delta_{set}$ ，因此保护不启动。这与 2.2 节的结论相同。

综上，本文所提保护可以准确地识别区内不同类型的断线和短路故障，并能准确地排除区外故障，符合选择性和灵敏性要求。

5.6 抗噪声干扰验证

为验证所提保护方案的抗噪声干扰能力，分别在正常运行、区外故障和区内故障下加入不同信噪比的噪声，保护的動作情况如表 7 所示。

所提保护方案的判据大多采用积分形式，由于噪声的平均值为零，因此有利于抵抗噪声干扰^[30]。对

于式(22)的判据，由于其本质为求电压平均值，故同样具有抗噪声干扰的能力。对于未采用积分形式的判据，为保证抗噪声干扰能力，先对测量数据进行滑动平均滤波处理^[31]，再进行计算、判别。

正常运行时，由于启动判据采用了积分形式，保护不会因噪声干扰而误动。对于噪声干扰下的区外故障，保护正常启动，方向判据依靠 Δu_a 、 Δi_a 积分值的乘积排除反向故障，边界判据经过滑动平均滤波处理后同样可排除正向区外故障，保护不会因噪声干扰而误动。对于噪声干扰下的区内故障，保护正常启动，经过滑动平均滤波处理后，各判据均可正确识别故障类型。

本文所提保护可抵御 20 dB 噪声干扰，具有较高的抗噪声干扰能力。

表 5 送端保护对各种故障的识别与应对情况

Table 5 Identification and response of sending-end protection under various faults

故障条件				$S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0?$	$ du_a/dt $ (kV/ms)	$ S(\Delta u_a)/S(\Delta u_b) $	$S(\Delta i_a) < 0?$	识别结果	应对策略
故障类型	故障位置	故障距离/km	过渡电阻/ Ω						
正极接地 短路故障 (pptg)	f_{i2}	100	0	是	3773.39	1.57	否	区内 短路 故障	发跳闸指令，若断路器失灵则断开此断路器所连母线上的其他所有断路器
	f_{i2}	100	200	是	2024.36	1.57	否		
	f_{i2}	200	0	是	5590.63	2.04	否		
	f_{i2}	200	200	是	2978.45	2.04	否		
双极短路 故障(ftp)	f_{i2}	100	0	是	15 695.61	1	否	区外故障	保护 不动作
	f_{i2}	200	0	是	16 413.05	1	否		
	f_{i2}	300	0	是	17 392.65	1	否		
	f_{i4}	20	0	是	544.48	1	否		
	f_1	—	0	是	1641.14	—	—		
	f_2	—	0	否	—	—	—		
	f_{23}	420	0	否	—	—	—		
正极断线 故障(pbrk)	f_{i2}	100	0	是	3471.46	1.33	是	区内	调整控制 策略
	f_{i2}	200	0	是	4961.36	1.63	是		
双极断线 故障(pnbrk)	f_{i2}	100	0	是	11 313.75	1	是	区外 故障	保护 不动作
	f_{i2}	200	0	是	11 711.57	1	是		
	f_{i2}	300	0	是	12 427.84	1	是		
	f_{i4}	20	0	是	507.29	—	—		
	f_{23}	420	0	否	—	—	—		
三相短路 故障	f_{s1}	—	0	—	—	—	—	—	保护 不启动
	f_{s2}	—	0	—	—	—	—		

表 6 受端保护对各种故障的识别与应对情况

Table 6 Identification and response of receiving-end protection under various faults

故障类型	故障条件			$S(\Delta u_a) \cdot S(\Delta i_a) < 0?$	$ du_a/dt $ (kV/ms)	$ S(\Delta u_a)S(\Delta u_b) $	是否发出 跳闸指令	断路器正 常跳闸?	\bar{u}/kV	δ_i/kA	识别 结果	应对 策略
	故障位置	故障距离/km	过渡电阻/ Ω									
正极 接地 短路 故障 (pptg)	f_{12}	100	0	是	8611.49	4.17	是	是	-4.03	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.22		②
	f_{12}	100	200	是	4597.10	4.18	是	是	4.05	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.06		②
	f_{12}	200	0	是	5248.90	1.97	是	是	-1.69	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.18		②
f_{12}	200	200	是	2809.88	1.98	是	是	2.38	—	区内 短路 故障	①	
							否	—	0.07		②	
f_{12}	200	400	是	1917.89	1.98	是	是	2.87	—	区内 短路 故障	①	
							否	—	-0.13		②	
双极 短路 故障 (ptp)	f_{12}	100	0	是	17 008.27	1	是	是	-4.14	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.36		②
	f_{12}	200	0	是	16 040.60	1	是	是	-5.13	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.37		②
	f_{12}	300	0	是	15 160.98	1	是	是	-6.86	—	区内 短路 故障	①
								否	—	-0.36		②
	f_{14}	20	0	否	—	—	否	—	—	—	区外 故障	—
								—	—	—		—
	f_1	—	0	否	—	—	否	—	—	—	区外 故障	—
								—	—	—		—
f_2	—	0	是	1674.89	—	否	—	—	—	区外 故障	—	
							—	—	—		—	
f_{23}	420	0	是	963.06	—	否	—	—	—	区外 故障	—	
							—	—	—		—	
正极 断线 故障 (pbrk)	f_{12}	100	0	是	7657.72	2.56	是	是	541.81	—	区内 断线 故障	④
								否	—	-1.80		③
	f_{12}	200	0	是	4671.74	1.58	是	是	402.61	—	区内 断线 故障	④
								否	—	-1.42		③
f_{12}	100	0	是	12 239.18	1	是	是	522.31	—	区内 断线 故障	④	
							否	—	-1.91		③	
双极 断线 故障 (pnbrk)	f_{12}	200	0	是	11 412.31	1	是	是	409.83	—	区内 断线 故障	④
								否	—	-1.60		③
	f_{12}	300	0	是	10 949.30	1	是	是	341.58	—	区内 断线 故障	④
								否	—	-1.58		③
f_{14}	20	0	否	—	—	否	—	—	—	区外 故障	—	
							—	—	—		—	
f_{23}	420	0	是	902.44	—	否	—	—	—	区外 故障	—	
							—	—	—		—	
三相短 路故障	f_{s1}	—	0	—	—	—	否(保护 不启动)	—	—	—	—	—
								f_{s2}	—	0		—

注：① 代表断路器重合闸；② 代表由相邻线路上的后备保护断开对应直流断路器；③ 代表换流站调整控制策略；④ 代表不采取措施，后续进行检修。

表 7 不同信噪比下保护的响应情况

Table 7 Response of protection under different SNRs

信噪比/dB	正常运行	区外故障	区内短路故障	区内断线故障
20	不启动	不动作	识别为短路故障	识别为断线故障
40	不启动	不动作	识别为短路故障	识别为断线故障
60	不启动	不动作	识别为短路故障	识别为断线故障

6 结论

目前大多数柔性直流电网短路保护配置时仅

考虑短路故障，当发生断线故障时，保护的動作正确性尚不明确。本文分析了断线故障下传统行波保护的動作特性，得出了送端保护可能将断线故障误判为反向区外短路故障、受端保护可能将断线故障误判为区内短路故障的结论。在此基础上，提出了一种新型的行波保护方案。该保护方案能够兼顾短路与断线故障识别：受端保护利用第二个电流波头特征和断路器跳闸后的线路电压水平识别短路与断

线故障, 送端保护利用电流首行波极性识别短路与断线故障, 两端保护均利用电压与电流变化量乘积的正负性识别正反向短路与断线故障。经仿真验证, 该保护方案在各种故障条件下均能准确识别并正确应对, 且有较高的速动性和抗噪声干扰能力。

参考文献

- [1] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.
GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.
- [2] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [3] 王帅, 任军辉, 娄彦涛, 等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 11-17.
WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible dc transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.
- [4] 谭喆, 高翔, 陈锐, 等. 多端柔性直流电网中机械式直流断路器的操作过电压分析[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 31-36.
TAN Zhe, GAO Xiang, CHEN Rui, et al. Operating over-voltage analysis of mechanical DC circuit breaker in multi-terminal flexible DC network[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 31-36.
- [5] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.
- [6] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 48-58.
CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinhong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 48-58.
- [7] 随顺科, 任铁强, 邹强, 等. 连接风电系统的柔性直流电网 MMC 在线投入分析与验证[J]. 供用电, 2022, 39(11): 26-31.
SUI Shunke, REN Tieqiang, ZOU Qiang, et al. Analysis and verification of MMC online entry into a flexible DC grid connected to wind power system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 26-31.
- [8] 雷傲宇, 汪林光, 梅勇, 等. 多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 55-60.
LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC networks[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 55-60.
- [9] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 50-55.
CHEN Fufeng, YANG Yang, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 50-55.
- [10] HE Jiawei, SHENG Yaru, LI Bin, et al. A novel segmented-COV-based single-ended line protection algorithm for the multiterminal MMC-HVDC system with no boundary reactor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(4): 5658-5670.
- [11] 邓丰, 张振, 钟航, 等. 基于首行波主频分量的柔性直流输电线路单端量行波保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5797-5808.
DENG Feng, ZHANG Zhen, ZHONG Hang, et al. Single-ended traveling wave protection for flexible DC transmission lines based on the main frequency component of the initial traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5797-5808.
- [12] PÉREZ-MOLINA M J, LARRUSKAIN D M, EGUÍA P, et al. Local derivative-based fault detection for HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 1521-1530.
- [13] 默增禄, 张子富, 胡光亚. ± 800 kV 直流特高压直线塔模型的导线断线试验分析[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 30-33.
MO Zenglu, ZHANG Zifu, HU Guangya. Experimental research for broken conductor wire of ± 800 kV DC EHV suspension tower model[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 30-33.
- [14] 赵越, 石立宝, 姚良忠, 等. 海上风电直流输电系统断线故障保护及恢复策略[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1703-1709.
ZHAO Yue, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. A fault protection strategy and restorative strategy for DC system incorporating offshore wind farm under open DC line fault[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1703-1709.
- [15] 贾科, 冯涛, 赵其娟, 等. 基于单端暂态电流和差比的柔性直流配电系统断线保护[J]. 电力系统自动化,

- 2019, 43(8): 150-157.
- JIA Ke, FENG Tao, ZHAO Qijuan, et al. Line breakage fault protection based on ratio between sum and difference of single-ended transient current for flexible DC distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 150-157.
- [16] 郑宗生, 张巍, 廖建权, 等. 基于改进极模变换的柔性直流输电系统断线故障分析与辨识[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 137-145.
- ZHENG Zongsheng, ZHANG Wei, LIAO Jianquan, et al. Analysis and identification of disconnection faults in flexible DC transmission systems based on an improved polar-mode transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 137-145.
- [17] 饶宏. 柔性直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [18] 张建坡, 赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 32-37.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.
- [19] 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司. 高压直流输电设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [20] 任师铎, 肖浩, 李银红. 高压直流输电线路行波保护实用整定原则[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 54-60.
- REN Shiduo, XIAO Hao, LI Yinhong. Practical setting principle of traveling wave protection for HVDC power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 54-60.
- [21] ZHAO Zhenting, LAN Tongkun, XIAO Hao, et al. Wave front rising time based traveling wave protection for multi-terminal VSC-HVDC grids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023, 144: 108534.
- [22] 李斌. 柔性直流系统故障分析与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [23] LAN Tongkun, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. High fault-resistance tolerable traveling wave protection for multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 943-956.
- [24] 张广斌, 王开福, 束洪春, 等. 基于波形群灵敏角特征的输电线路故障单端行波辨识与测距[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3789-3804.
- ZHANG Guangbin, WANG Kaifu, SHU Hongchun, et al. Single-ended traveling wave surge identification and fault location for transmission lines based on the sensitive angle characteristic of waveshape with multiple wavefronts[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3789-3804.
- [25] 邓丰, 曾哲, 祖亚瑞, 等. 基于行波全景特征深度挖掘的单端故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1310-1322.
- DENG Feng, ZENG Zhe, ZU Yarui, et al. Single-ended fault location method based on traveling wave panoramic fault characteristics deep mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1310-1322.
- [26] 王鹤, 胡倩慈, 李筱婧, 等. 计及行波折反射的柔性直流电网故障限流器参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 54-63.
- WANG He, HU Qianci, LI Xiaojing, et al. Parameter optimization of a fault current limiter in a flexible DC power grid considering refraction and reflection of a traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 54-63.
- [27] 王常骐, 路佳宁, 洪玮, 等. 基于直流限流电路的直流单极接地故障自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4877-4887.
- WANG Changqi, LU Jianing, HONG Wei, et al. An adaptive reclosing technology for DC pole-to-ground fault based on DC current limiting circuit[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4877-4887.
- [28] 李妮, 焦在滨, 齐杉. 基于直流断路器动作响应的环状柔性直流配电网后备保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5785-5797.
- LI Ni, JIAO Zaibin, QI Shan. A backup protection scheme based on the response of the DC circuit breaker tripping for the meshed DC distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5785-5797.
- [29] WANG Jianping, BERGGREN B, LINDEN K, et al. Multiterminal DC system line protection requirement and high speed protection solutions[C] // CIGRÉ Symposium, May 27-28, 2015, Lund, Sweden: 1-9.
- [30] 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. A fault protection scheme based on the difference of current-limiting reactor voltage for overhead MMC based DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6617.
- [31] 张会来, 张伟. 快速响应的频率自适应滑动平均滤波锁相方法[J]. 电力电子技术, 2021, 55(1): 63-67.
- ZHANG Huilai, ZHANG Wei. Frequency adaptive moving average filter based phase-locked loop with fast response[J]. Power Electronics, 2021, 55(1): 63-67.

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-08-22

作者简介:

沈毅(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网保护与整定; E-mail: shenyi_1920@hust.edu.cn

李银红(1976—), 女, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统继电保护整定计算、直流保护故障特性分析与整定等。E-mail: liyinhong@hust.edu.cn

(编辑 许威)