

基于零模增量的多端柔直线路单极接地保护方法

鄢仁武, 张国和, 李培强

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 柔性直流系统发生的故障通常为单极接地故障, 发生故障后保护应在几毫秒内隔离故障线路, 避免对整个系统产生不利影响, 如何实现故障线路快速可靠识别是 MTDC 直流线路保护中亟待解决的重要问题。首先, 分析了模量分解后的线路故障特征, 其次, 利用线路两端保护安装处零模电流增量的相关性与零模电压增量方向构建保护一体化判据, 提出一种基于零模增量的单极接地故障保护方案, 该方法可在故障后 1 ms 内完成故障判别, 在 500 Ω 过渡电阻下仍能准确辨识, 兼顾了速动性与可靠性, 最后通过仿真验证本保护方案的可行性与优越性。

关键词: 柔性直流输电; 单极接地故障; 线路保护; 模量分解; 相关性; 一体化判据

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0573-09

Single-pole grounding protection method for multi-terminal flexible DC transmission line based on zero-mode increment

YAN Renwu, ZHANG Guohe, LI Peiqiang

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The fault of the flexible DC system is usually a single-pole grounding fault. After the fault occurs, the protection should isolate the fault line within a few milliseconds to avoid adversely affecting the entire system. How to realize fast and reliable identification of the fault line is an important problem to be solved in MTDC DC line protection. Firstly, the fault characteristics of the line after modulus decomposition are analyzed. Secondly, the correlation of the zero-mode current increment at the protection installation at both ends of the line and the direction of the zero-mode voltage increment are used to construct the integrated protection criterion, and a single-pole grounding fault protection scheme based on zero-mode increment is proposed. This method can complete fault identification within 1 ms after the fault occurs, and can accurately perform identification under the 500 Ω transition resistance, taking into account both speed and reliability. Finally, the feasibility and superiority of the protection scheme are verified by simulation.

Keywords: flexible DC transmission; single-pole grounding fault; line protection; modulus decomposition; correlation; integrated criterion

柔性直流系统发生线路单极接地故障时, 故障电流小、正负极电压不对称运行、故障特征不明显导致故障识别困难^[1]。为了保证在换流站闭锁前完成保护动作, 需在故障后几毫秒内识别出故障线路, 这要求保护具有极高的速动性^[2], 因此须研究兼顾速动性与可靠性的故障隔离和清除

方法。

常规的保护方案如欠压、过流等方法已无法适应柔性直流输电保护短时间内快速隔离故障的需求^[3], 国内外研究了大量柔性直流线路故障保护问题, 按照基于单端量与双端量将研究的保护方法分为两大类。单端量保护基于本地暂态量无

通信需求,文献[4]基于方向元件与暂态特性提出一种基于单端暂态能量的保护方法,可满足速动性,但过于依赖线路边界条件;文献[5]利用故障前行波波特征差异对故障进行判别,受过渡电阻影响较小但保护首末端存在一定的死区;文献[6]根据不同频率成分的衰减速度差异完成故障识别,提高了抗过渡电阻能力,但是保护易受干扰信号影响,需要选择合适的信号处理方法。另一类基于双端电气量的保护方案可靠性高,不存在死区,文献[7]通过测量线路两端暂态电气量的比值来判断故障位置,抗过渡电阻与噪声干扰能力强,但保护动作可能存在延时;文献[8]将相关系数分析应用于故障区域识别,不受线路参数与故障位置影响,但其研究主要集中在母线侧;文献[9]基于行波折射系数构造故障识别判据,对数据同步性要求低,但速动性不佳。

综上,当前的柔性直流输电系统的单端量保护方案容易受到过渡电阻和电磁噪声的影响,其准确性和可靠性不稳定。而双端量保护方案,在提高线路全长保护的可靠性方面表现更佳,但是其实时性受到两站间通信传输延迟及设备处理信号时间的限制。采用模量分解方法可以有效减轻正负极线路耦合对故障检测准确性的不利影响。本研究分析了对称双极接线方式下的多端柔性直流系统,提出一种基于零模增量的柔直线路保护方案。利用两端保护安装处零模电流增量的相关性与两端零模电压增量方向相结合构成保护一体化判据,实现区内故障识别与故障选极。

1 MMC-MTDC 系统分析

1.1 MMC-MTDC 系统的拓扑结构

本研究参照张北四端柔直工程搭建,测试系统如图 1 所示。该系统包含张北-MMC1、康保-MMC2、丰宁-MMC3 以及北京-MMC 4 共 4 个换流站。其中 MMC1 和 MMC2 为功率送出侧;MMC3 作为调节换流站;MMC4 为受端换流站^[10]。图中 L_{mn} 为柔性直流输电线路,BUS_{*m*} 为直流母线, P_{mn} 为保护装置(其中 $m, n=1,2,3,4$,为换流站序号)。

1.2 线路模量分解

柔性直流输电系统发生单极接地故障时,故障极电压骤降,正负极电气量不对称,非故障极电压由于耦合作用也将产生波动,但其变化远小于故障极。正极、负极线路间由于耦合作用使非故

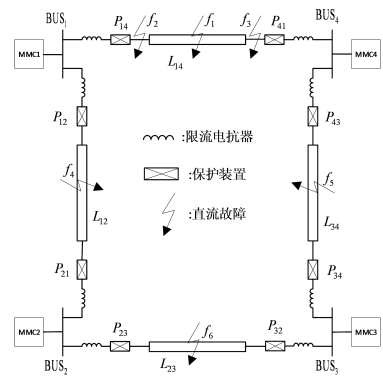


图 1 四端柔性直流输电系统

Fig.1 Four-terminal flexible DC transmission system

障极也产生较大的感应电流^[11]。将正、负极的线路电压分别记为 u_p 和 u_n ,正、负极的线路电流分别记为 i_p 和 i_n ,通过凯伦鲍尔变换进行解耦,将正负极电气量分解为线模和零模分量, u_1, u_0, i_1, i_0 分别为电压和电流的线模、零模分量,如式(1)(2):

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(1)(2)可知,线路零模分量表示双极线路中同向部分的暂态分量,即零模分量在正极与负极中是同向流通的。利用模量分解构造模量等效电路,如图 2 所示。

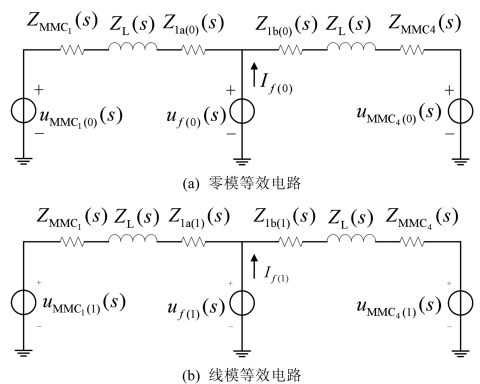


图 2 模量等效电路

Fig.2 Modulus equivalent circuit

图 2 中, $u_{MMC(0)}(s), u_{MMC(1)}(s)$ 分别为换流器等效零模、线模 s 域电压; $Z_{MMC}(s), Z_L(s)$ 分别为换流器与限流电抗器等效 s 域阻抗; $Z_{la(0)}(s), Z_{lb(0)}(s), Z_{la(1)}(s), Z_{lb(1)}(s)$ 分别为故障点两侧线路零模和线模等效阻抗; $u_{f(0)}(s), i_{f(0)}(s), u_{f(1)}(s), i_{f(1)}(s)$ 分别为故障点零模和线模 s 域等效电压、

电流分量。由图 2 结合线路边界条件可得正负极故障电流 $i_p(s)$ 和 $i_n(s)$ 分别为:

$$\begin{cases} i_p(s) = \frac{u_{MMC1(1)}(s)}{[Z_L(s) + Z_{MMC1}(s)][Z_{(0)eq}(s) + Z_{(1)eq}(s)]} \cdot \left[\frac{Z_{Ib(1)eq}(s)}{Z_{Ia(1)eq}(s) + Z_{Ib(1)eq}(s)} + \frac{Z_{Ib(0)eq}(s)}{Z_{Ia(0)eq}(s) + Z_{Ib(0)eq}(s)} \right] \\ i_n(s) = \frac{u_{MMC1(1)}(s)}{[Z_L(s) + Z_{MMC1}(s)][Z_{(0)eq}(s) + Z_{(1)eq}(s)]} \cdot \left[\frac{Z_{Ib(1)eq}(s)}{Z_{Ia(1)eq}(s) + Z_{Ib(1)eq}(s)} - \frac{Z_{Ib(0)eq}(s)}{Z_{Ia(0)eq}(s) + Z_{Ib(0)eq}(s)} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $Z_{(0)eq}(s)$ 、 $Z_{(1)eq}(s)$ 分别为零模、线模等值阻抗; $Z_{Ia(0)eq}(s)$ 、 $Z_{Ia(1)eq}(s)$ 、 $Z_{Ib(0)eq}(s)$ 、 $Z_{Ib(1)eq}(s)$ 分别为故障点 f_1 与两侧换流器之间的线路零模、线模等值阻抗。其中:

$$\begin{cases} Z_{Ia(1)eq}(s) = Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) + Z_{Ia(1)}(s) \\ Z_{Ib(1)eq}(s) = Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) + Z_{Ib(1)}(s) \\ Z_{(1)eq}(s) = Z_{Ia(1)eq}(s) // Z_{Ib(1)eq}(s) \\ Z_{Ia(0)eq}(s) = Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) + Z_{Ia(0)}(s) \\ Z_{Ib(0)eq}(s) = Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) + Z_{Ib(0)}(s) \\ Z_{(0)eq}(s) = Z_{Ia(0)eq}(s) // Z_{Ib(0)eq}(s) \end{cases} \quad (4)$$

计算正负极的电流差:

$$i_p(s) - i_n(s) = \frac{u_{MMC1(1)}(s)}{[Z_L(s) + Z_{MMC1}(s)][Z_{(0)eq}(s) + Z_{(1)eq}(s)]} \cdot \left[\frac{2Z_{Ib(0)eq}(s)}{Z_{Ia(0)eq}(s) + Z_{Ib(0)eq}(s)} \right] \quad (5)$$

由式(5)可知, 正极电流远大于负极, 即发生单极接地故障时, 电流增量主要由故障极决定。

1.3 故障特性分析

以母线流向线路为电流的参考方向, 如图 3 所示。其中, M、N 分别代表线路首末端; p、n 分别代表线路正负极。

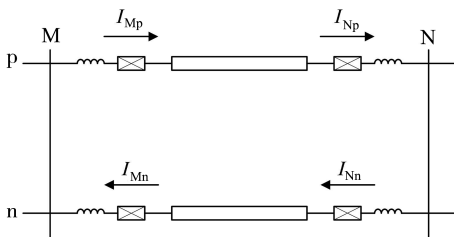


图 3 正常运行时电流方向

Fig.3 Current direction in normal operation

当系统正常运行时, 在同条线路上首末两端电流实际流向与参考方向一侧相同一侧相反。由式(2)可得, 正常运行时, 由于两极电流分量幅值相同, 线路中不存在零模分量。

当线路发生单极接地短路故障后, 故障点电压迅速向 0 突变, 将故障点等效为一个大小与故障前运行电压相反的阶跃电压源, 在附加故障电源 U_f 的作用下, 正负极线路两端故障电流的流向变化如图 4 所示, R_f 表示过渡电阻。

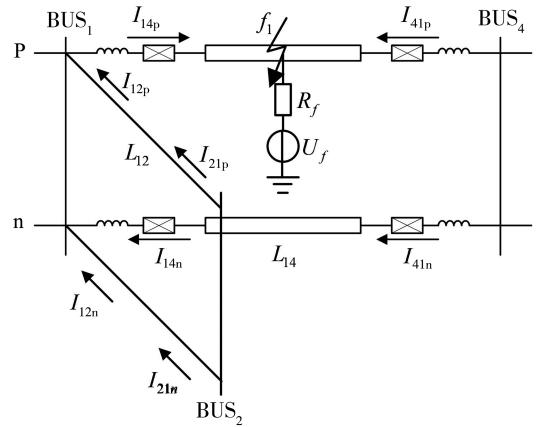


图 4 单极接地故障时电流方向

Fig.4 Current direction when single-pole grounding fault occurs

当线路 L_{14} 发生正极接地故障 f_1 时, 该故障对线路 L_{14} 为区内正极接地故障, 线路正极两端电流分量 I_{14p} 、 I_{41p} 流向都与参考方向相同; 线路负极首端电流分量 I_{14n} 流向与参考方向相反, 末端电流分量 I_{41n} 流向与参考方向相同。

两端零模电流增量分别为:

$$\Delta I_{14(0)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta I_{14p} + \Delta I_{14n}) \quad (6)$$

$$\Delta I_{41(0)} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta I_{41p} + \Delta I_{41n}) \quad (7)$$

由式(6)(7)可得, 发生单极接地故障时, 零模电流增量方向主要由故障极决定, 故障 f_1 对线路 L_{14} 为区内故障, 两端零模电流增量方向为正相关, 均与参考方向相同。故障 f_1 对线路 L_{12} 为区外故障, 同极线路首端正负极电流增量方向与参考方向相反, 末端正负极电流方向与参考方向相同, 零模电流增量为负相关。

综上所述, 发生区内单极故障时, 线路两端零模电流增量方向为正相关; 而故障发生在区外时,

线路两端零模电流增量方向为负相关。因此,可基于此特性判断故障发生位置。

2 暂态量提取及相关性系数确定

2.1 暂态量提取

当线路发生故障后,大量不同频率分量的故障行波由故障点向输电线路两端传播。其故障特征主要受过渡电阻与噪声信号等因素的影响,过渡电阻值与故障电流及故障持续时间呈反比,噪声信号干扰会导致暂态量波动性增大,由于本研究针对单极接地故障,暂不考虑对故障特征影响较小的分布式电容大小。

在柔性直流输电系统中,暂态持续时间短且特征不明显。为了有效区分区内故障并明确电气量的变化趋势,可以采用滑动平均滤波技术提取直流线路的暂态电流特征量,并分析故障电流的变化。滑动平均滤波器是一种非递归型低通滤波器,它通过对特定时间窗内数据的平均处理来抑制噪声。具体操作中,新的数据点被加入到缓冲区并更新平均值计算,并移出最早的数据点,确保了数据窗的持续更新和噪声的有效消除。相较于传统低通滤波器,滑动平均滤波器响应速度更快、滤波精度更高,特别适用于需要在线实时处理的应用场景。

线路暂态电气量经过滤波处理后输出的离散表达式为:

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=k-(N-1)}^k F(j) \quad (10)$$

式中, N 为滤波时数据窗内采样点数; $F(j)$ 为线路第 j 时刻的电气量采样点。

2.2 相关性系数确定

单纯根据单端电气量特性进行故障判定的方法对线路边界条件过于依赖,在噪声等干扰下容易误动,且无法耐受较高过渡电阻。传统基于双端电气量的保护多采用暂态电流极性特征或波形相关度构造保护判据,需要进行数据同步,对通信的要求较高,即无法兼顾双端量保护的可靠性与速动性。

本研究,通过对线路两端零模电流增量进行相关性分析来实现故障定位。与传统基于暂态量的保护方法相比,相关性分析只需传递逻辑信号,不需要传输两端暂态电气量,对通信要求低,显著提高保护的速动性,同时暂态量数值变化对相关

性分析影响较小,故该方法不受线路参数影响,可有效提高保护的可靠性。本研究以线路两端零模电流增量为参量,通过两参量的相关性对故障区域进行判别。

由于故障电流变化具有不确定性,本研究选用不受数据条件限制的 Spearman 相关系数进行分析。该方法对异常大数据不敏感,不受幅值变化影响,可显著提高保护的可靠性。

评估两组序列是否具有相关性,首先需将序列中的原始数据 $x(n)$ 、 $y(n)$ 按照从小到大的顺序重新排列为新的等级序列 $(X(n), Y(n))$,由新的等级序列计算代入式(11)计算相关系数 $\rho_{x,y}$ 。

$$\rho_{x,y} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})(Y_n - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2 \sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

式中, $X(n)$ 、 $Y(n)$ 为原始数据 $x(n)$ 、 $y(n)$ 对应的等级序列, \bar{X} 、 \bar{Y} 表示 $X(n)$ 、 $Y(n)$ 的平均值。

相关系数值体现了两组序列 $x(n)$ 、 $y(n)$ 的相关性,处于 $(-1, 1)$ 间。 $\rho_{x,y} > 0$ 说明两组数据为正相关; $\rho_{x,y} < 0$ 说明两组数据为负相关, $|\rho_{x,y}|$ 越接近 1,说明两组数据的关联程度越高。

3 柔性直流输电线路保护方案

3.1 保护启动判据

直流线路发生故障时,暂态电压具有明显的故障特性,发生短路故障后,线路电压将发生突变,由正常运行状态在额定电压附近波动迅速向 0 跌落,因此可基于此特性构建保护启动判据。在线路保护安装处检测线路暂态电压,当连续 n 个采样电压幅值 $|U_t|$ 低于保护启动阈值 U_{set} 时,判断输电线路可能出现故障,保护启动。即保护启动判据为:

$$|U_t| < U_{set} \quad (12)$$

综合考虑保护启动的速动性与可靠性,选取采样点数 $n=3$,采样频率为 10 kHz,保护启动数据窗长为 $TW_1 = nT = 0.3$ ms。为避免保护启动过于频繁同时在高阻下也能可靠识别,设定保护启动阈值为 $U_{set} = 0.9 U_N$,其中 U_N 为正常运行电压。

3.2 故障选线判据

故障发生区域不同时零模电流方向不同,利用 Spearman 相关系数理论来辨别区内故障,令 $x(n)$ 、 $y(n)$ 分别为线路两端零模电流增量 $\Delta I_{M(0)}$

和 $\Delta I_{N(0)}$, 设参考电流正方向为母线侧流向线路侧。若两端零模电流增量方向相同, 计算得到的 $\rho_{x,y} > 0$, 则说明两端零模电流增量为正相关, 可判断故障为区内故障。 $\rho_{x,y} < 0$, 说明两端零模电流增量为负相关, 判断该故障为区外故障。综上可得 Spearman 相关系数的故障选线判据如式 (13) 所示。

$$\begin{cases} \rho_{x,y} > 0, \text{区内故障} \\ \rho_{x,y} < 0, \text{区外故障} \end{cases} \quad (13)$$

为便于提取故障暂态特征量, 本研究的选线方案设置数据窗长 $TW_2 = 0.5$ 来记录故障波形。

3.3 故障选极判据

采用对称双极 MMC 换流器的柔性直流输电系统发生单极接地故障时, 健全极线路仍可正常运行, 仅需切除故障极, 故设定故障选极判据。

线路发生单极接地故障时, 故障位置和过渡电阻对故障特征影响较小, 线路故障极保护安装处暂态电压均向 0 突变, 非故障极电压由于耦合作用将产生波动, 但波动幅度远小于故障极, 零模电压增量主要由故障极决定。正极接地故障时, 正极电压骤降, 负极电压基本不变, 零模电压增量为负; 负极故障时, 负极电压向 0 突变, 正极电压保持在额定电压附近, 零模电压增量为正。

定义方向信号函数 S , 当两端零模电压增量小于 0 时 S 取 -1, 两端零模电压增量大于 0 时 S 取 1, 如式 (14) 所示。

$$S = \begin{cases} -1 & (\Delta U_{M(0)} < 0) \cap (\Delta U_{N(0)} < 0), \text{正极故障} \\ 1 & (\Delta U_{M(0)} > 0) \cap (\Delta U_{N(0)} > 0), \text{负极故障} \end{cases} \quad (14)$$

故障选极判据与故障选线判据将同时运行, 为保持同步性, 数据窗长 TW_3 与故障选线的数据窗长 TW_2 相同, 即 $TW_3 = 0.5$ ms, 采样点个数 $n = 5$ 。

3.4 整体保护流程

本研究整体保护方案流程图如图 5 所示。

基于两端保护安装处零模电流增量的相关性与两端零模电压增量方向设计保护一体化判据, 当连续 n 个暂态电压幅值低于保护启动阈值时, 启动保护, 对暂态电气量进行滤波处理, 计算线路两端零模电流增量相关系数, 判断故障位置, 同时计算两端零模电压增量极性, 判断故障类型, 最后断路器动作, 切除故障。

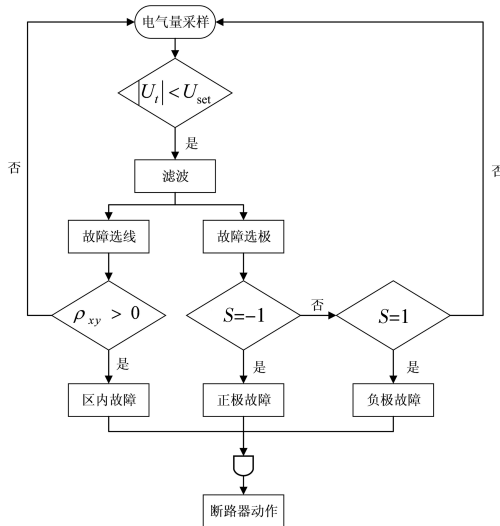


图 5 整体保护流程图

Fig.5 Overall protection flow chart

4 仿真验证

4.1 仿真模型

根据张北柔直输电系统在 PSCAD 平台中搭建四端 MMC-HVDC 仿真模型, 其系统结构如图 1 所示。其中 MMC3 为主控站采用定无功功率控制和定直流电压控制, MMC1、MMC2、MMC4 采用定有功和定无功功率控制, 系统额定电压为 ± 500 kV。相关参数如表 1 所示。

其中, MMC1-MMC4 线路长度约 189.6 km; MMC1-MMC2 线路长度约 49.5 km; MMC2-MMC3 线路长度约 207 km; MMC3-MMC4 线路长度约 176.5 km。

表 1 换流站相关参数

Tab.1 Related parameters of converter station

| 换流站 | 额定容量/MW | 子模块数 | 子模块电容/mF | 桥臂电感/mH | 限流电感/mH |
|------|---------|------|----------|---------|---------|
| MMC1 | 1 700 | 200 | 15 | 50 | 150 |
| MMC2 | 850 | 200 | 15 | 100 | 150 |
| MMC3 | 850 | 200 | 15 | 100 | 150 |
| MMC4 | 1 700 | 200 | 15 | 100 | 150 |

4.2 保护方案可行性验证

以各线路上的保护判据动作情况来验证所提方案是否正确, 分别在线路 L_{14} 故障点 f_1 和线路 L_{12} 故障点 f_4 设置正负极接地故障。

4.2.1 正极接地故障

设置故障点 f_1 处在 2 s 时发生正极接地故障,故障后的仿真波形如图 6 所示。图 6(a)为线路 L_{14} 暂态电压波形,故障发生后,正极线路电压由 500 kV 迅速跌到保护启动阈值,经过 0.3 ms 启动保护。图 6(b)和图 6(c)分别为线路 L_{14} 和线路 L_{12} 两端零模电压增量变化波形图,发生正极接地故障时,在滤波后提取数据窗长 TW_3 内线路两端零模电压,此时两端零模电压增量均为负。图 6(d)和图 6(e)分别为线路 L_{14} 和线路 L_{12} 两端零模电流增量变化波形图,从图 6 可以看出,故障线路两端零模电流增量方向相同,非故障线路两端零模电流增量方向相反,与前文理论分析结果一致。计算保护启动后数据窗长 TW_2 内各线路两端零模电流增量 Spearman 相关系数,得到正极故障 Spearman 相关系数如表 2 所示。

表 2 正极故障 Spearman 相关系数

Tab.2 Positive fault Spearman correlation coefficients

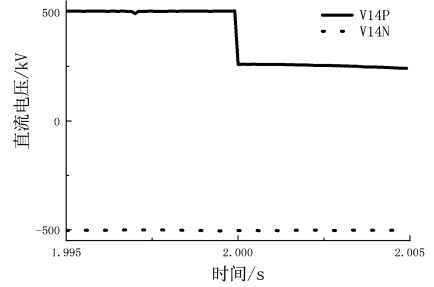
| 线路 | 相关系数 | S 值 | 故障类型 |
|----------|------|-----|------|
| L_{14} | 1 | -1 | 区内正极 |
| L_{12} | -1 | -1 | 区外故障 |
| L_{34} | -1 | -1 | 区外故障 |
| L_{23} | -1 | -1 | 区外故障 |

从表 2 可以看出, f_1 处发生故障对于线路 L_{14} 为区内故障,对于其他线路为区外故障,验证了所提保护方案可以在 1.0 ms 内快速准确的判断故障位置,保护可靠动作。

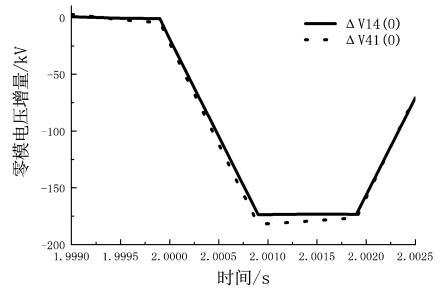
由于本研究提出的保护方案仅需传递方向信号,对通信要求较低,保护动作时间随故障位置离保护安装处距离的增加而延长,最长线路康保-丰宁端口故障时,故障判据用时 0.5 ms,方向信号传输时间约 1.1 ms,共用时 1.6 ms,此时为保护动作最长时间,仍能快速可靠动作。

4.2.2 负极接地故障

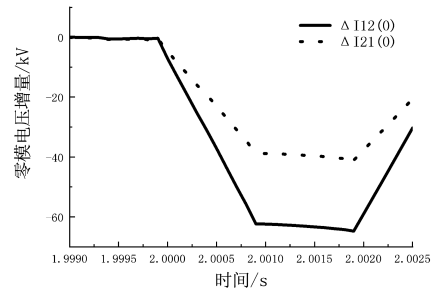
设置 2 s 时故障点 f_4 处发生负极接地故障,故障后的仿真波形如图 7 所示。图 7(a)为线路 L_{12} 暂态电压波形,故障发生后,负极线路电压由 -500 kV 迅速突变,达到保护启动阈值,经过 0.3 ms 保护启动。图 7(b)和图 7(c)分别为线路



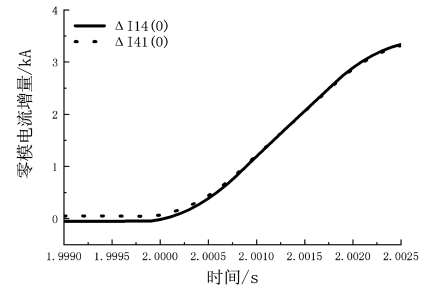
(a) 线路 L_{14} 暂态电压



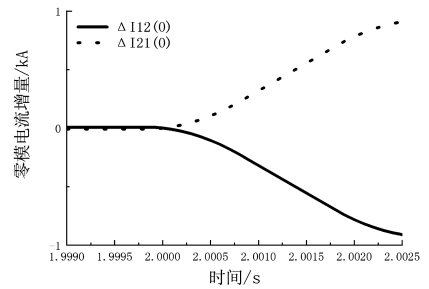
(b) 线路 L_{14} 两端零模电压增量



(c) 线路 L_{12} 两端零模电压增量



(d) 线路 L_{14} 两端零模电流增量

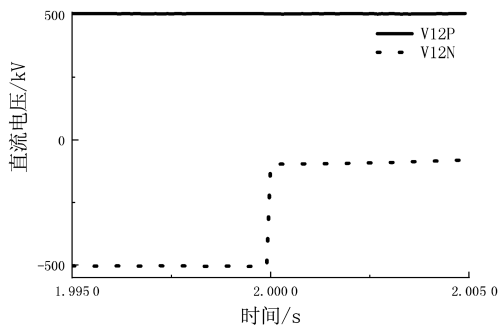


(e) 线路 L_{12} 两端零模电流增量

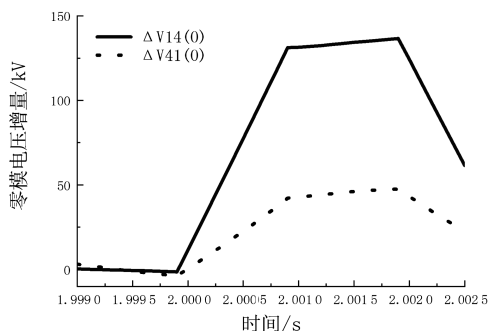
图 6 正极接地故障仿真波形图

Fig.6 Simulation waveform of positive grounding fault

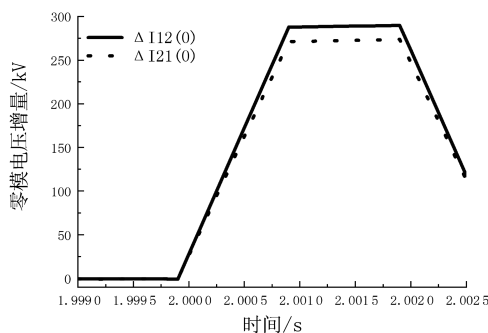
L_{14} 和线路 L_{12} 两端零模电压增量变化波形图,发生负极接地故障时,在滤波后提取数据窗长 TW_3 内线路两端零模电压,此时两端零模电压增量均为正。图 7(d)和图 7(e)分别为线路 L_{14} 和线路 L_{12} 两端零模电流增量变化波形图。



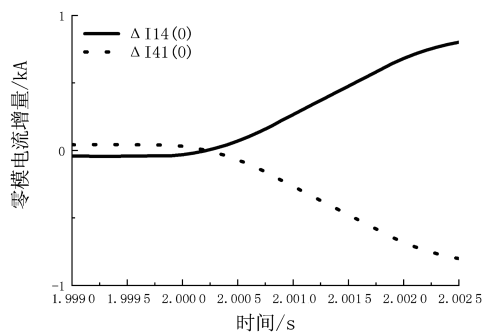
(a) 线路 L_{14} 暂态电压



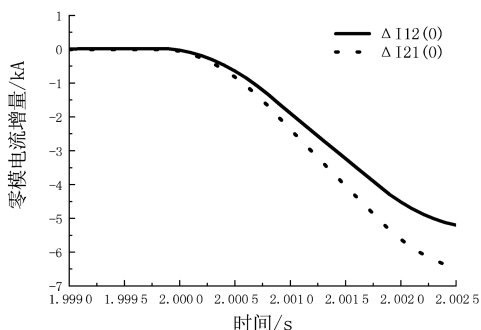
(b) 线路 L_{14} 两端零模电流增量



(c) 线路 L_{12} 两端零模电压增量



(d) 线路 L_{14} 两端零模电流增量



(e) 线路 L_{12} 两端零模电流增量

图 7 负极接地故障仿真波形图

Fig.7 Simulation waveform of negative grounding fault

从图 7 可以看出,故障线路两端零模电流增量方向相同,非故障线路两端零模电流增量方向相反,计算保护启动后数据窗长 TW_2 内各线路两端零模电流增量 Spearman 相关系数,得到负极故障 Spearman 相关系数如表 3 所示。

表 3 负极故障 Spearman 相关系数

Tab.3 Negative fault Spearman correlation coefficient

| 线路 | 相关系数 | S 值 | 故障类型 |
|----------|------|-----|------|
| L_{14} | -1 | 1 | 区外故障 |
| L_{12} | 1 | 1 | 区内负极 |
| L_{34} | -1 | 1 | 区外故障 |
| L_{23} | -1 | 1 | 区外故障 |

综上所述,当发生单极故障时,区内故障线路两端零模电流增量方向相同,相关系数计算结果为 1,区外非故障线路两端零模电流增量方向相反,相关系数计算结果为-1;若故障为正极接地故障,故障线路两端零模电压增量由正极决定,且均小于 0,计算所得 S 值为-1,若故障为负极接地故障,故障线路两端零模电压增量取决于负极,均大于 0,计算所得 S 值为 1,与前文理论分析一致。

4.3 不同故障位置和过渡电阻对保护的影响

上述仿真验证了本研究所提保护方案的可行性,本节在四端柔直系统中各输电线路中点位置设定单极接地故障 $f_1 \sim f_6$,在线路 L_{14} 上 M、N 两侧边界设置故障点 f_2, f_3 ,并在 $f_1 \sim f_3$ 故障点设置不同大小的过渡电阻来验证本保护方案对整个系统的适用性及抗干扰能力,通过 Spearman 相关性分析以及方向信号判据得到各个故障对应的

相关系数和 S 值,如表 4 所示。

由表 4 证实了保护方法能准确辨别系统任何位置发生的故障,且不同过渡电阻对所提保

护判据影响很小,即所提保护方案在整个系统中都能可靠辨识故障位置且抗过渡电阻能力强。

表 4 不同故障类型对应的相关系数与 S 值

Tab.4 Correlation coefficients and S values corresponding to different fault types

| 故障类型 | 故障位置 | 过渡电阻/ Ω | 相关系数 | | | | S | 故障识别 |
|--------|-------|----------------|----------|----------|----------|----------|----|-----------------|
| | | | L_{14} | L_{12} | L_{34} | L_{23} | | |
| 正极接地故障 | f_1 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | f_2 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | f_3 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | L_{14} 区内正极故障 |
| | f_4 | 0.01 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | L_{12} 区内正极故障 |
| | f_5 | 0.01 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | L_{34} 区内正极故障 |
| | f_6 | 0.01 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | L_{23} 区内正极故障 |
| 负极接地故障 | f_1 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | f_2 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | f_3 | 0.01 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 100 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | | 500 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | L_{14} 区内负极故障 |
| | f_4 | 0.01 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | L_{12} 区内负极故障 |
| | f_5 | 0.01 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | L_{34} 区内负极故障 |
| | f_6 | 0.01 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | L_{23} 区内负极故障 |

4.4 噪声干扰的影响

实际运行中,电流波形在遭受噪声的干扰时会产生畸变,影响保护的可靠性。所提保护基于线路两端零模电流增量的相关性构造保护判据,理论上数据整体的相关性判别结果受噪声的影响较小,在线路故障发生时受到噪声干扰保护仍能可靠识别故障。为验证其对噪声干扰的耐受能力,在线路 L_{14} 故障点 f_1 和线路 L_{12} 故障点 f_4 处发生单极接地故障时,加入不同信噪比的噪声,由于加入了滤波处理减小了噪声干扰所产生的数据波动,两组序列的整体变化趋势几乎不受影响。计算噪声干扰下线路两端零模电流增量 Spearman 相关系数如表 5 所示。

表 5 线路两端零模电流增量 Spearman 相关系数

Tab.5 Spearman correlation coefficients of zero-mode current increment at both ends of the line

| 故障类型 | f_1 正极接地故障 | | f_2 负极接地故障 | | |
|------|--------------|----------|--------------|----------|----|
| | 信噪比/dB | 30 | 50 | 30 | 50 |
| 相关系数 | L_{14} | 1 | 1 | -1 | -1 |
| | L_{12} | -1 | -1 | 1 | 1 |
| | L_{34} | -1 | -1 | -1 | -1 |
| | L_{23} | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 故障识别 | L_{14} | L_{14} | L_{12} | L_{12} | |

由表5可以看出,在不同信噪比的噪声干扰下,本研究所提的保护方案仍能可靠识别故障,具有良好的抗噪声干扰能力。

5 结论

本研究分析了对称双极接线方式下的四端柔性直流系统模量分解后线路两端零模电流的增量特征,提出了一种基于零模电流增量相关性与零

模电压增量方向相结合的保护一体化判据,配合保护启动判据,可以在故障后1ms内完成区内外故障识别与故障选极,具有良好的抗过渡电阻和噪声干扰能力,同时该方法仅需传输方向信号,对通信要求低,不易受线路参量影响导致误判,兼顾了可靠性与速动性,仿真验证了该保护方法的适用性与优越性。

参考文献:

- [1] 刘海金,李斌,温伟杰,等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术,2021,45(9):3463-3480.
- [2] 鄢仁武,苏子彬,方略斌. 双极短路故障下基于暂态能量抑制的MMC-HVDC电网限流设备的参数优化[J/OL]. 中国电机工程学报:1-16[2024-05-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230935>.
- [2] 胡凯凡,茆美琴,何壮,等. 直流短路故障下基于暂态能量抑制的MMC-HVDC电网主电路电感参数优化[J]. 中国电机工程学报,2022,42(5):1680-1689.
- [3] 王渝红,傅涛涛,曾琦,等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高电压技术,2019,45(8):2362-2374.
- [4] 付华,陈浩轩,李秀菊,等. 含边界元件的MMC-MTDC直流侧单端量故障辨识方法[J]. 电工技术学报,2021,36(1):215-226.
- [5] 陈森,贾科,姚昆鹏,等. 基于故障前行波极值时间的柔性直流线路单端量保护方法[J]. 中国电机工程学报,2023,43(10):3742-3758.
- [6] 张韵琦,丛伟,张玉玺. 基于初始电压行波频域衰减速率的MMC-HVDC线路保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):143-155.
- [7] 刘佳硕,李永丽,陈晓龙,等. 基于暂态电流比值的多端柔性直流电网保护[J]. 电网技术,2023,47(4):1439-1449.
- [8] 鄢仁武,俞智鹏,方略斌. 适用于MMC-MTDC的母线侧故障分析及保护策略[J/OL]. 高电压技术:1-14[2024-05-23]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221081>.
- [9] 戴志辉,秦昊宇,邱宏逸,等. 基于电压行波折射系数的柔性直流电网线路纵联保护[J]. 电网技术,2022,46(12):4676-4691.
- [10] 林少伯,李新年,雷霄,等. 张北柔性直流电网运行方式转换风险分析及预防措施[J]. 电网技术,2023,47(10):4017-4025.
- [11] 周泽昕,曹虹,柳焕章,等. 考虑极间互感影响的高压直流输电线路双端电流积累量保护[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3851-3864.

(责任编辑:方素华)