DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.174　　**中图分类号**：TM773　　**文献标志码**：A

基于故障电流特征的多端柔性直流电网故障识别

付 华，张 辉

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院，葫芦岛 125105)

摘要：为满足多端柔性直流电网保护的快速性和可靠性要求，提出1种基于故障电流分量的故障识别方案。方案利用故障电流行波分量的传播过程，对区内和区外故障时的电流进行分析，通过故障电流的变化差异对区内外故障进行识别；将双极线路解耦得到线模分量，故障电流线模分量的极性可作方向性判据；用计算得到的正、负极故障电流的平均值之比来实现故障的选极。在PSCAD/EMTDC中建立多端柔性直流输电线路仿真模型，仿真结果表明，所提的故障识别方法无需两端通信，仅利用单端故障电流特征量就能对各种故障进行快速、准确地辨识，且具有一定的抗过电阻能力，满足柔直输电的故障保护要求。

关键词：柔性直流输电；故障识别；故障电流；故障选极；线模电流

Fault Identification of Multi-terminal MMC-HVDC Grid Based on Fault Current Characteristics

FU Hua, ZHANG Hui

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To meet the requirements of fast performance and reliability for multi-terminal modular multi-level converter based high voltage direct current (MMC-HVDC) grid protection, a fault identification scheme based on the characteristics of fault current component is proposed. First, the currents under faults inside and outside of a region are analyzed by using the propagation process of the traveling wave component of fault current, and the inside and outside faults are identified through the difference in changes in fault current. Second, the line-mode component is obtained by decoupling the bipolar line, and the polarity of the line-mode component of fault current can be taken as a direction criterion. Third, the calculated ratio between the averages of positive and negative fault currents is used to realize the fault pole selection. A simulation model of multi-terminal MMC-HVDC transmission line is established in PSCAD/EMTDC, and simulation results show that the proposed fault identification method can identify all kinds of faults quickly and accurately only by using the single-terminal fault current characteristics without the need of two-terminal communication, and it also has the capability of anti-overresistance, thereby satisfying the requirements for MMC-HVDC transmission fault protection.

Keywords: Modular multi-level converter based high voltage direct current (MMC-HVDC) transmission; fault identification; fault current; fault pole selection; line-mode current

高压直流HVDC(high voltage direct current)输电在远距离输电、大区域电网互联等方面得到了广泛应用，研究其保护性能可以提高电网的稳定性和安全性[1-2]。对于高压直流输电的故障识别已经有比较先进的研究，文献[3]对传统的高压直流输电系统进行研究，提出了1种基于改进灰狼算法优化时间卷积神经网络的故障检测方法，将故障电流信号直接用作时间卷积网络 TCN(temporal convolutional

收稿日期：2022-09-20；**修回日期**：2022-10-21，2022-11-04；
录用日期：2022-11-22；**网络首发日期**：2022-12-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51974151，71771111)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 51974151 and 71771111

network)的输入数据，从而进行故障识别；文献[4]通过提取线模分量 Teager 能量算子，进而和输电线路两侧正负极电流突变量能量比值组成特征向量，利用一维卷积神经网络 1D-CNN(1D convolutional neural network)对特征向量集进行训练和测试，实现 HVDC 的区内外故障判别和故障极选择。

基于模块化多电平换流器的柔性直流 MMC-HVDC(modular multi-level converter based HVDC)输电技术具有输出性能好、可向无源网络供电和易于扩展等优点[5-8]。柔直输电作为新一代的高压直流输电，对其稳定性的研究刻不容缓。近年来，已经有许多学者进行了研究。文献[9]提出 1 种基于单端量的交叉重叠差分变换线路故障识别方法，定义 *SP* 为交叉重叠差分变换后的电压和电流信号的乘积，*K* 为 *SP* 绝对值的最大值，根据 *K* 值判断区内外故障，但此方法无法对故障极进行判别；文献[10]通过计算电流变化率与电压的相关系数，对回路测量点的电感特征进行表示，定义正、负极相关系数的比值为感性模糊系数，根据感性模糊系数的符号识别单极接地故障，然后根据感性模糊系数的绝对值判断故障极；文献[11]利用低压作为启动判据，通过限流电抗器上的电压变化率大小和极性确定故障区间，通过检验测量点的零模故障分量进行故障极的确定；文献[12]提出 1 种通过广义 S 变换提取直流线路故障电流高频频带幅值特征的单端量保护新方法，搭建三端柔性直流输电系统验证方案的可靠性。

针对真双极四端柔直输电系统，文献[13]研究电网系统的单极接地故障类型，通过分析故障零模网络的阻抗特性，提出了基于暂态功率方向的保护方案；文献[14]提出单端暂态量的故障辨识方法，通过线路故障期间的暂态电流来判别故障区域，利用正负极暂态电压比来区分故障极；文献[15]分析了区内、外故障时，故障电流反行波的幅值特性，提出了 1 种反向行波幅值比的行波方向辨识方案。基于电压、电流和功率的保护量单端保护原理简单、易于实现，且不需要线路两端的信息共享，但对高阻故障的灵敏性不高。通过结合柔性直流电网的直流电抗器，研究保护区内和区外不同的故障特性，可提高线路的故障识别效果，增强保护方法的抗高阻能力[16]。

本文将张北柔直系统作为背景，对多端柔直系统的直流侧进行故障分析。通过分析区内外故障分量电流行波的传播过程，提出 1 种基于故障电流特征量的柔性直流电网故障识别方案。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了四端柔性直流系统模型，验证了所提方案在不同故障情况下的保护性能。

1　直流线路故障电流分析

MMC-HVDC 的直流侧故障分为 MMC 换流站闭锁之前和之后 2 个部分。在换流站闭锁前，直流线路故障点的电流主要为换流站中子模块电容的放电电流；在换流站闭锁后，主要为交流侧电流通过二极管向直流侧故障点产生故障电流。由于柔直输电系统属于弱阻尼系统，故障电流在几毫秒内就能对柔直电网产生极大危害，因而对其故障的保护必须在 MMC 闭锁前完成，以保证柔直电网的稳定运行。

四端柔直输电系统的主接线方式为对称双极结构，系统中包括大量半桥子模块的换流站和多个直流断路器，线路采用架空输电线路。四端柔性直流系统单极结构如图 1 所示，其中 4 条线路 Line1~Line4 的长度分别为 200、200、180 和 50 km。实验研究以 Line1 的保护 p1 为对象，故障 F1 和 F4

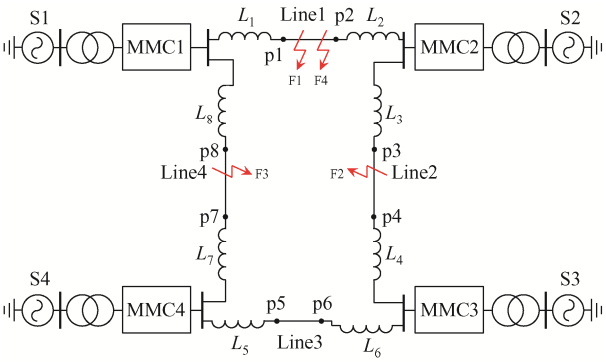


图 1　四端柔性直流系统单极结构

Fig. 1 Single-pole structure of four-terminal MMC-HVDC system

对 Line1 为区内故障；F2 和 F3 为区外故障，其中 F3 为反向故障，F2 为正向故障。

1.1 区内外故障行波分析

当直流输电线路出现故障时，在行波传播的初始阶段，换流器的控制系统不会立即响应，因而换流器等效电压源和等效阻抗可近似不变。

利用叠加定理，将发生故障的直流输电系统分解为正常运行系统和故障附加系统 2 个部分。由于正常运行系统中的直流线路电流基本恒定，故可利用故障附加系统对直流线路进行故障分析。为更加准确地研究故障后线路各个部分的电流变化情况，对各类故障模型简化后，利用电压、电流行波的传播过程，通过电流波的各种折反射得出保护测量点的故障电流，使分析结果更加可靠。

当 Line1 发生 F1 故障，即区内故障时，分析故障时故障点的电流行波传播过程中线路电压、电流的变化情况。F1 故障后根据叠加定理得到的附加状态如图 2 所示。图中：z_{M1} 和 z_{M2} 分别为换流站 MMC1 和 MMC2 的等效阻抗；z_L 为限流电抗器的阻抗；z_c 为输电线路波阻抗；i_{1q} 和 i_{1f} 分别为故障点向 MMC1 侧传播的正向和反向电流波；i_1 为故障分量；u_n 为输电线路故障点正常运行时的电压；u_f 为故障点电压；R_f 为故障点的接地电阻。

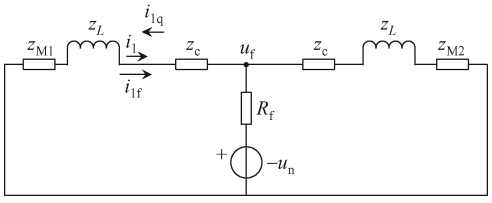


图 2 F1 故障时的附加状态

Fig. 2 Additional state under fault F1

故障分量 i_1 可表示为

$$i_1 = i_{1q} + i_{1f} = \frac{u_{1q}}{z_c} - \frac{u_{1f}}{z_c} = (1-\alpha)\frac{u_{1q}}{z_c} \tag{1}$$

式中：u_{1q} 为前向电压行波；u_{1f} 为反向电压行波；α 为反射系数，$\alpha = \dfrac{z_{M1} + z_L - z_c}{z_{M1} + z_L + z_c}$。

前向电压行波 u_{1q} 可表示为

$$u_{1q} = \frac{-u_n z_c}{2R_f + z_c} \tag{2}$$

结合式(1)和式(2)，得到故障分量 i_1 为

$$i_1 = \frac{2z_c}{z_{M1} + z_L + z_c} \cdot \frac{-u_n}{2R_f + z_c} \tag{3}$$

当故障电流行波传过限流电抗器时，忽略行波本身的衰减作用，利用彼得逊法则得到保护 p1 及母线处的故障电流和电压变化情况，如图 3 所示。图中：i_{2q} 为折射电流波，u_{2q} 为折射电压波。

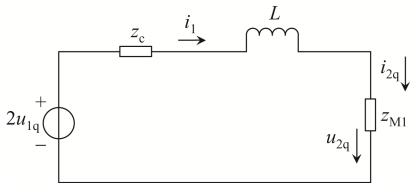


图 3 彼得逊等效图

Fig. 3 Peterson equivalent diagram

根据图 3 及电路原理可列写方程

$$2u_{1q} = i_{2q}(z_c + z_{M1}) + L\frac{\mathrm{d}i_{2q}}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

$$i_1 = i_{1q} + i_{1f} = \frac{u_{1q}}{z_c} - \frac{u_{1f}}{z_c} = \frac{u_{2q}}{z_{M1}} = i_{2q} \tag{5}$$

$$\begin{cases} i_{2q} = \dfrac{2u_{1q}}{z_c + z_{M1}}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}) \\ u_{2q} = \dfrac{2z_{M1}}{z_c + z_{M1}}u_{1q}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}) \\ u_{1f} = \dfrac{z_{M1} - z_c}{z_c + z_{M1}}u_{1q} + \dfrac{2z_c}{z_c + z_{M1}}u_{1q}\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}} \end{cases} \tag{6}$$

式中，T 为时间常数，$T = \dfrac{L}{z_c + z_{M1}}$，也等于传播到母线上的电压波 u_{bus}。

由以上推导可知，发生区内故障时，故障点的电压、电流行波将向线路两端传输，当故障行波到达线路电抗器时会发生折反射。

研究保护 p1 的区外正向故障，即 Line2 发生 F2 故障。F2 故障时的故障附加状态如图 4 所示，本文分析故障时系统的电压、电流变化情况。

根据已推导的公式，可得到换流站 MMC2 的母线电压为

$$u_{b2} = \frac{2z_{M2}}{z_c + z_{M2}}u_{1q}(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}) \tag{7}$$

经过电抗器 L 后，u_{b2} 变化率下降。在不考虑

多次折反射的情况下，其主要为前行波，即

$$u_{2q}=\frac{z_L}{z_{M2}+z_L}u_{b2} \tag{8}$$

$$i_2=i_{2q}+i_{2f}=\frac{u_{2q}}{z_c} \tag{9}$$

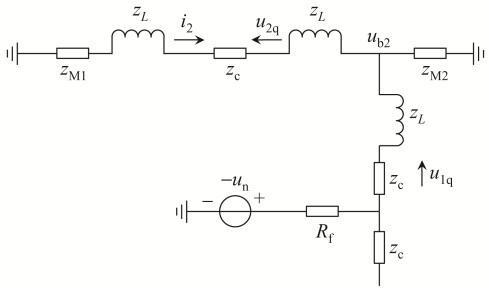


图 4　F2 故障时的附加状态

Fig. 4 Additional state under fault F2

当发生区外正向故障时，在保护点测得的故障电流 i_2 为

$$i_2=\frac{2z_{M2}z_Lu_{1q}(1-e^{-\frac{t}{T}})}{(z_c+z_{M2})(z_L+z_{M2})z_c} \tag{10}$$

比较发生区内故障和正向区外故障时的保护 p1 所测电流，可以认为换流器阻抗相等，则

$$i_1:i_2=\frac{(z_c+z_{M2})z_c}{z_{M2}+z_L+z_c}:z_{M2}//z_L(1-e^{-\frac{t}{T}}) \tag{11}$$

实际中的直流架空线路，波阻抗 z_c 通常为几百 Ω，限流电抗器 L 通常为几百 mH[14]。对于实际的 MMC 换流器，r_{arm} 为桥臂电阻，r_{on} 为通态电阻，$r_{arm}+r_{on}<<z_c$，MMC 的等效电阻可以忽略。因此，理论上说，式(11)前一项数量级为10^2，后一项数量级为 10^1，i_1 高于 i_2 一个数量级。

对于典型的输电线路，线路波阻为 400 Ω，换流站等效阻抗为 2.5+40j，限流电抗器等效阻抗为 100j，因此，$i_1>i_2$，即区内故障时电流变化量大于区外故障电流变化。

1.2 故障极和健全极电流特性分析

当柔直系统直流侧发生单极故障时，双极线路间产生的电磁耦合会使健全极也产生较大的感应电流。由于双极直流输电线路的正负极之间存在耦合，可以通过极模变换将正负极分解为零模分量和线模分量，通过分析故障分量图，研究故障极和健全极的电流变化。即

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}u_1\\u_0\end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1&-1\\1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_P\\u_N\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}i_1\\i_0\end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1&-1\\1&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_P\\i_N\end{bmatrix}\end{cases} \tag{12}$$

式中：u_1、i_1 为在正极下变换的线模分量；u_0、i_0 为在正极下变换的零模分量；u_P、i_P 为正极电压、电流；u_N、i_N 为负极电压、电流。

Line1 发生区内正极接地故障后，简化电路，利用极模变换可将双极线路解耦得到线模和零模网络，分别如图 5 和图 6 所示。图中：u_{f1} 和 u_{f0} 分别为测量点故障电压的线模和零模分量；i_{f1} 和 i_{f0} 分别为故障电流的线模和零模分量；z_{c1} 和 z_{c0} 分别为线路的线模和零模波阻抗。

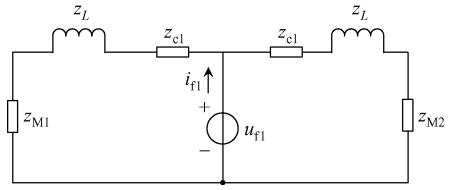


图 5　故障线模分量网络

Fig. 5 Line-mode component network under fault

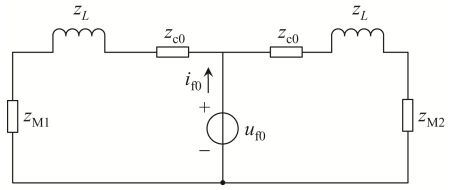


图 6　故障零模分量网络

Fig. 6 Zero-mode component network under fault

由图 5 和图 6 可见，在区内正极接地故障时，线模和零模故障电流满足

$$\begin{cases}i_{f1}=\dfrac{u_{f1}}{z_{c1}+z_L+z_{M1}}+\dfrac{u_{f1}}{z_{c1}+z_L+z_{M2}}\\ i_{f0}=\dfrac{u_{f0}}{z_{c0}+z_L+z_{M1}}+\dfrac{u_{f0}}{z_{c0}+z_L+z_{M2}}\end{cases} \tag{13}$$

由线模和零模故障电流可以得到故障时两极线路的故障电流为

$$\begin{cases}i_P=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\dfrac{u_{f1}}{z_{e1}//z_{e2}}+\dfrac{u_{f0}}{z_{e3}//z_{e4}}\right)\\ i_N=\dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\dfrac{u_{f0}}{z_{e3}//z_{e4}}-\dfrac{u_{f1}}{z_{e1}//z_{e2}}\right)\end{cases} \tag{14}$$

式中：z_{e1}为换流站 MMC1、限流电抗器和故障线路线模波阻抗的等值阻抗；z_{e2}为换流站 MMC2、限流电抗器和故障线路线模波阻抗的等值阻抗；z_{e3}为换流站 MMC1、限流电抗器和故障线路零模波阻抗的等值阻抗；z_{e4}为换流站 MMC2、限流电抗器和故障线路零模波阻抗的等值阻抗。

由$i_P : i_N > 1$可知，正极接地故障时，正极电流变化大于负极电流，即故障极的电流大于健全极电流。

当直流线路发生双极故障时，由于双极输电线路拓扑结构具有对称性，故障后的零模分量不存在，此时正负极故障电流关系基本满足

$$\left|\frac{i_P}{i_N}\right| = 1 \tag{15}$$

2 故障识别方案

2.1 启动判据

当直流线路发生故障时，故障点会产生明显的电流变化，根据 di / dt 的大小可以进行故障启动。然而输电网络发生高阻接地故障时，此算法的灵敏度降低。

为了充分利用故障时的采样数据，实现保护的简单快速启动，定义故障电流梯度为

$$\nabla_k = (i_{k+1} + i_{k+2} + i_{k+3}) - (i_{k-1} + i_{k-2} + i_{k-3}) \tag{16}$$

式中：∇_k为测量点故障电流梯度；i_{k+1}为测量点后一时刻的故障电流。

利用测量点的前后 3 组采样数据表征故障电流的变化程度，既可以迅速动作，又对高阻接地具有高灵敏度。因此，线路保护的启动判据可以设置为

$$\nabla_k > D_{set} \tag{17}$$

式中，D_{set}为判据阈值。

2.2 区内外故障识别

对故障电流幅值的处理是识别区内外故障的关键，设 k 时刻差分电流为

$$\mathrm{d}i(k) = i(k) - i(k-1) \tag{18}$$

从式(18)可知，当每个采样时刻的差分电流幅值较大时，电流波动比较明显；当差分电流幅值较小时，电流的波动也较小。

为提高故障线路判据的可靠性，采用差分电流的累积量定量地表征一定时间窗内的区内外故障电流波动情况，区内外故障辨识的判据可表示为

$$K_i = \sum_{k=t_0}^{t} |\mathrm{d}i(k)| \tag{19}$$

式中：t_0为保护启动时刻；t为定量时间窗。

区内外故障辨识判据可细分为

$$\begin{cases} K_i \geqslant K_{iset} & \text{区内故障} \\ K_i < K_{iset} & \text{区外故障} \end{cases} \tag{20}$$

式中，K_{iset}为差分电流累积量的整定阈值。

2.3 方向元件

区外故障可分为正向区外故障和反向区外故障，图 7 和图 8 分别是发生正向和反向故障时，保护 p1 测得的故障电流线模分量。

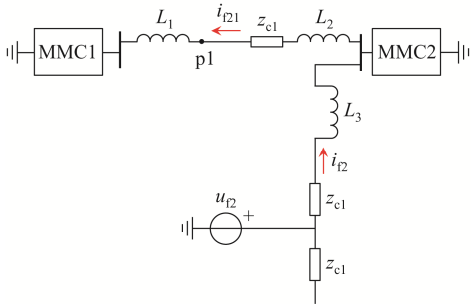


图 7 正向区外故障时的附加状态

Fig. 7 Additional state under forward outside fault

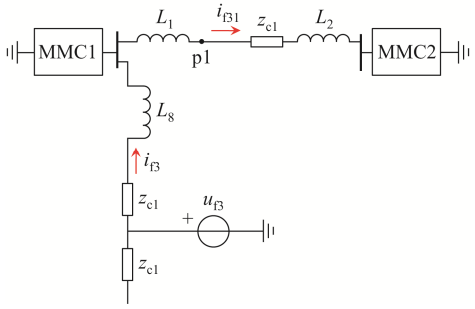


图 8 反向区外故障时的附加状态

Fig. 8 Additional state under reverse outside fault

为全面利用故障电流的特征，通过对比图 7 和图 8，可得到方向性判据：故障电流线模分量的正负极性可以对正、反向故障进行区分。发生正向故

障的判据为

$$\Delta i_{\mathrm{l}} > \Delta i_{\mathrm{lset}} \tag{21}$$

式中：Δi_{l} 为直流线路故障时保护 p1 测得的故障电流线模分量；Δi_{lset} 为故障电流线模分量整定值，考虑系统正常运行中各种因素的影响，可取 Δi_{lset} = 0.015 kA。

2.4 故障极判据

双极直流输电线路的正负极存在耦合，当线路某极发生故障时，健全极电流也会出现电气量的变化，因此需进一步判断故障极。

定义故障平均电流 Δi 为

$$\Delta i = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[\Delta i(k) - i_{\mathrm{dc}}\right]^2} \tag{22}$$

式中：N 为时间窗 T_{l} 内的采样点数；$\Delta i(k)$ 为故障电流在采样点 k 的值；i_{dc} 为正常运行情况下电流的稳定值。为满足保护的速动性要求，可取时间窗 T_{l}=1 ms。

根据上述原理构建直流故障选极的判据，定义正负极平均电流比为 K_{PN}，K_{PN} 可表示为

$$K_{\mathrm{PN}} = \frac{\Delta i_{\mathrm{P}}}{\Delta i_{\mathrm{N}}} \tag{23}$$

式中，Δi_{P} 和 Δi_{N} 分别为测量点的正极和负极故障平均电流。

结合前文分析，考虑到噪声及各种因素的影响，为提高抗干扰能力，引入可靠系数 K_{rel} = 1.15，整理可得

$$\begin{cases} K_{\mathrm{PN}} > 1.15 & \text{正极故障} \\ K_{\mathrm{PN}} < 0.87 & \text{负极故障} \\ 0.87 \leqslant K_{\mathrm{PN}} \leqslant 1.15 & \text{双极故障} \end{cases} \tag{24}$$

2.5 故障识别流程

多端柔性直流输电线路的故障识别流程如图 9 所示。首先，利用输电线路的故障电流梯度判断保护是否启动，若满足保护启动条件，则进行区内外故障判别。若判据识别为区内故障，则利用故障极判据准确判断故障发生的位置；若判据识别为区外故障，需使用方向元件对正向和反向故障进行区分，最后利用故障极判据进行故障极识别。

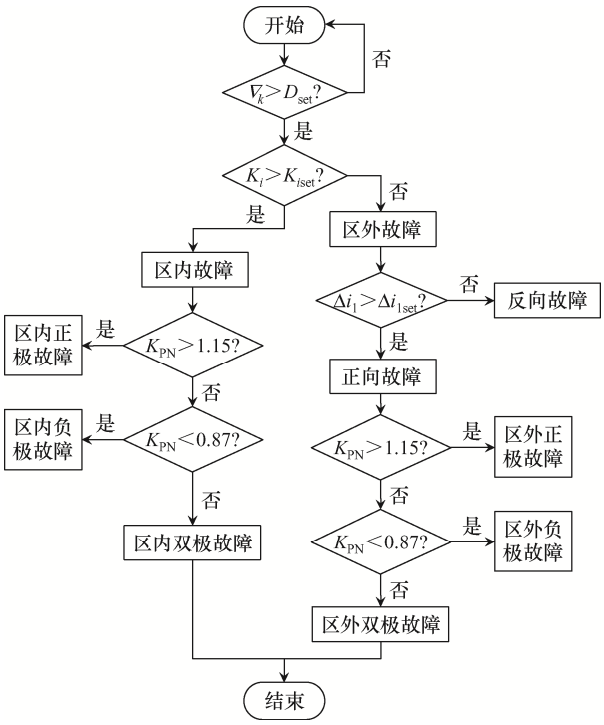


图 9　故障辨识方案流程

Fig. 9 Flow chart of fault identification scheme

3　仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建±400 kV 的四端柔性直流输电系统，验证所提的故障识别方案。MMC1 和 MMC3 采用定直流电压和定无功功率控制，MMC2 和 MMC4 采用定有功功率和定无功功率控制。同时，MMC 换流站均采用双闭环矢量控制，直流线路两端均装设 200 mH 的限流电抗器，MMC 调制方式采用最近电平逼近。具体仿真参数见表 1。为了仿真阈值的选取更为准确，数据处理时间窗取 1 ms，采样频率取 10 kHz。

表 1　仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	交流电压/kV	直流电压/kV	换流站量/MW	桥臂子模块数	桥臂电感/mH
MMC1	400	±400	800	200	29
MMC2	100	±400	800	200	29
MMC3	400	±400	800	200	29
MMC4	150	±400	800	200	29

3.1 判据阈值选取

利用仿真实验对故障辨识判据的阈值进行选取，其中启动判据是根据故障时电流突增这一原理提出的。四端柔直系统在正常运行下，Line1 的稳定运行电流为 0.56 kA，依据正常运行电流的变化率不低于 40 p.u./s，可设定线路故障识别的启动判据 D_{set}=0.066 kA。

研究 Line1 的 p1 保护性能，当本线路的各个位置发生故障时，为 p1 保护的区内故障；当 Line2 发生故障时，为 p1 保护的区外故障。为了有效区分区内和区外故障，实验中分别在 Line1 和 Line2 的不同位置设置单极故障，对其单端电流累积量 K_{iset} 进行整定选取，见表 2。

表 2 保护 p1 单端电流累积量

Tab. 2 Single-ended current accumulation under protection p1

故障位置	Line1 故障 K_i	Line2 故障 K_i
首端	4.61	0.58
1/4 处	3.74	0.46
1/2 处	3.23	0.38
3/4 处	2.82	0.29
末端	2.47	0.22

分析表 2 中的数据可知，故障电流单端累积量 K_i 能显著提取保护区内故障和区外故障的信号信息，且故障位置越远，保护 p1 测得的故障电流越小，反之亦然。为提高故障辨识判据的准确性及抗过电阻能力，取保护 p1 区内的差分故障电流累积量 K_i 最小值的 1/3 作为整定值，取 K_{iset}=0.82 kA。

3.2 区内故障

依据 Line1 的保护 p1，当区内发生单极和双极故障时，验证所提保护方案的可行性。

3.2.1 正极故障

在距离 Line1 100 km 的位置设置单极接地故障时，p1 位置所测得的正负极故障电流如图 10 所示。设置故障发生在 1.5 s 时，接地电阻为 50 Ω，选取故障后 3 ms 的电流波形变化。图中：I_{1P} 为正极故障电流；I_{1N} 为负极故障电流。

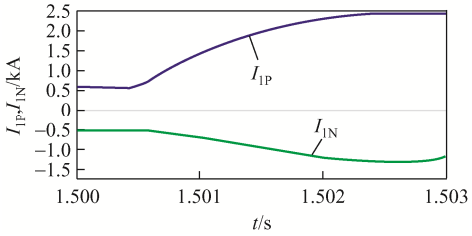


图 10 正极故障时 p1 正负极电流

Fig. 10 Positive and negative currents at p1 under positive fault

由图 10 可见，在故障发生后的 0.000 5 s，正极线路的电流开始发生较大的扰动，测量故障电流梯度为 3.124 kA，满足故障的启动判据。提取并计算正极故障电流累积量 K_i 的值为 1.40 kA，大于整定值 0.82 kA，判定为区内故障。

计算得到正极故障平均电流 $\Delta i_P = 0.984$ kA，负极故障平均电流 $\Delta i_N = 0.528$ kA，则正负极平均电流比 $K_{PN} \approx 1.864$，故障极判据为正极故障。经所提辨识方法分析，此故障为区内正极故障。

3.2.2 双极故障

在距离 Line1 100 km 的位置设置双极故障时，p1 位置所测得的正负极故障电流如图 11 所示。设置故障发生在 1.5 s 时，接地电阻为 50 Ω，选取故障后 3 ms 的电流波形变化。图中负极电流也发生扰动是由正负极线路耦合导致的。

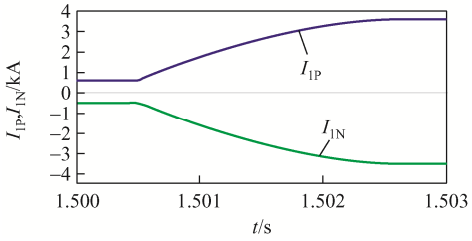


图 11 双极故障时 p1 正负极电流

Fig. 11 Positive and negative currents at p1 under bipolar fault

由图 11 可见，在故障发生后的 0.000 4 s，由于线路及故障对称，正极和负极线路的电流开始发生变化幅度一致且较大的扰动，测量故障电流梯度为 4.563 kA，远大于故障的启动判据。提取并计算故障电流累积量 K_i 的值为 1.26 kA，大于整定值 0.82 kA，判定为区内故障。

计算得到正极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{P}}=0.794$ kA，负极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{N}}=0.795$ kA，则正负极平均电流比 $K_{\mathrm{PN}}\approx1.000$，故障极判据为双极故障。经所提辨识方法分析，此故障为区内双极故障。

3.3 区外故障

3.3.1 正向区外故障

在距离 Line2 20 km 的位置设置单极故障时，p1 位置所测得的正负极故障电流如图 12 所示。设置故障发生在 1.5 s 时，接地电阻为 50 Ω，观察故障后 3 ms 的电流波形变化。

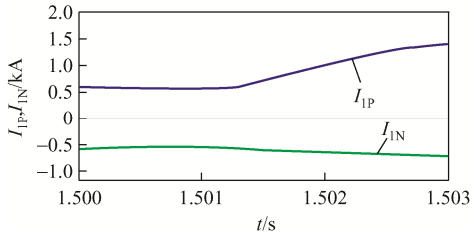


图 12　正向区外故障时 p1 正负极电流

Fig. 12 Positive and negative currents at p1 under forward outside fault

由图 12 可见，由于故障距离较远，电流故障行波传输需要时间，在故障发生后的 0.001 1 s，正极线路的电流开始发生较大的扰动，测量故障电流梯度为 1.290 kA，满足故障的启动判据。提取并计算正极故障电流累积量 K_i 的值为 0.43 kA，小于整定值 0.82 kA，判定为区外故障。

此时，方向元件动作，图 13 为 p1 测得的故障电流线模分量，极性为正，判定为正向故障。计算得到正极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{P}}=0.339$ kA，负极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{N}}=0.106$ kA，则正负极平均电流比 $K_{\mathrm{PN}}\approx3.198$，故障极判据为正极故障。经所提辨识方法分析，此故障为区外正向正极故障。

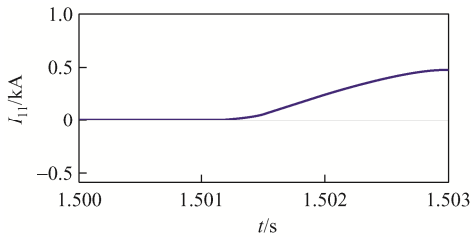


图 13　正向区外故障时 p1 线模电流

Fig. 13 Line-mode current at p1 under forward outside fault

3.3.2 反向区外故障

在距离 Line4 25 km 的位置设置单极故障时，p1 位置所测得的正负极故障电流如图 14 所示。设置故障发生在 1.5 s 时，接地电阻为 50 Ω，选取故障后 3 ms 的电流波形变化。

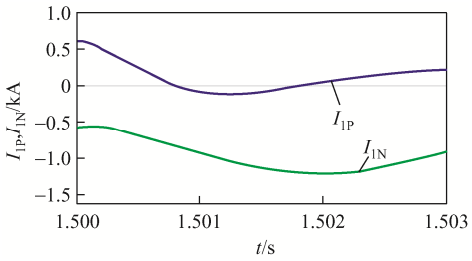


图 14　反向区外故障时 p1 正负极电流

Fig. 14 Positive and negative currents at p1 under reverse outside fault

由图 14 可见，在故障发生后的 0.000 1 s，正极线路的电流开始发生较大的扰动，测量故障电流梯度为 1.925 kA，满足故障的启动判据。提取并计算正极故障电流累积量 K_i 的值为 0.68 kA，小于整定值 0.82 kA，判定为区外故障。

此时，方向元件动作，图 15 为 p1 测得的故障电流线模分量，极性为负，判定为反向故障。计算得到正极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{P}}=0.523$ kA，负极故障平均电流 $\Delta i_{\mathrm{N}}=0.354$ kA，则正负极平均电流比 $K_{\mathrm{PN}}\approx1.477$，故障极判据为正极故障。经所提辨识方法分析，此故障为区外反向正极故障。

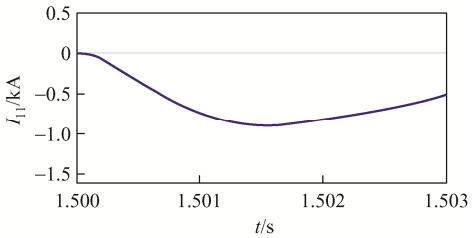


图 15　反向区外故障时 p1 线模电流

Fig. 15 Line-mode current at p1 under reverse outside fault

综上所述，仅利用保护装置测得的单端故障电流的特征就能实现区内外故障的区分及方向的判别，具有简单实用性；在故障距离较远的情况下，也能在故障发生后的 2.1 ms 内实现动作，具有速动性，满足故障保护的要求。验证了所提辨识方法可

以简单、快速和准确地识别故障。

3.4 辨识方法性能

对于所提的故障辨识方法，故障类型、故障位置及过渡电阻均会对辨识结果产生影响。为验证辨识方法的性能，以保护 p1 为参考，改变 3 种影响因素，最终输出结果见表 3~表 5。

表 3 Line1 下判断结果(R_f=100 Ω)

Tab. 3 Judgment results for Line1 (R_f=100 Ω)

故障位置/km	K_i /kA	Δi_P /kA	Δi_N /kA	K_{PN}
0-正极	1.51	2.13	1.67	1.28
50-负极	1.29	1.23	1.82	0.68
100-双极	1.01	1.43	1.43	1.00
150-负极	0.94	0.96	1.35	0.71
200-正极	0.84	1.26	0.83	1.52

表 4 Line2 下判断结果(R_f=200 Ω)

Tab. 4 Judgment results for Line2 (R_f=200 Ω)

故障位置/km	K_i /kA	Δi_P /kA	Δi_N /kA	K_{PN}	Δi_l /kA
0-正极	0.32	0.30	0.17	1.77	0.160
50-负极	0.23	0.10	0.29	0.34	0.085
100-双极	0.21	0.27	0.27	1.00	0.072
150-负极	0.15	0.16	0.21	0.76	0.037
200-正极	0.09	0.13	0.07	1.86	0.022

表 5 Line4 下判断结果(R_f=300 Ω)

Tab. 5 Judgment results for Line4 (R_f=300 Ω)

故障位置/km	K_i /kA	Δi_P /kA	Δi_N /kA	K_{PN}	Δi_l /kA
0-正极	0.23	0.34	0.21	1.62	−0.210
25-双极	0.22	0.31	0.30	1.03	−0.014
50-负极	0.21	0.19	0.29	0.66	−0.150

由表 3~表 5 可知，在区内外不同位置发生接地电阻分别为 100、200 和 300 Ω 的故障时，保护 p1 可以准确识别区内各种类型的故障。

综上所述，所提故障辨识方法受故障位置、类型影响不大，且抗过渡电阻能力强，多种故障情况都能快速、准确地识别，满足多端柔性直流电网的保护要求。在实际应用中，所提方法可通过“继电保护装置+直流断路器”实现线路保护，直流断路器安装于输电线路两端。首先，利用继电保护装置中的测量部分对电网中的电流进行采样，可每 1 ms 采样 10 个点；然后，将采样数据进行处理，进而计算电流累积量、正负极平均电流比等；最后，将所得数据与预先设置好的整定值进行比较，若超过整定值，继电保护装置可控制直流断路器的开断状态，对识别出的故障线路进行切除。

4 结论

针对多端柔性直流输电系统直流侧发生故障的情况，本文通过故障电流行波传播分析区内故障和区外故障的变化，提出基于故障电流特征的辨识方法，得出以下结论。

(1)所提辨识方法仅通过测量单端的电流量即可实现故障的快速、正确识别，无需两端通信，检测速度快，无需处理分析复杂数据，因此具有较高的可靠性和灵敏性。

(2)通过研究不同故障位置、故障类型和过渡电阻对辨识结果的影响，分析所提方法的性能。结果表明，该辨识方法在各类故障情况下均能保持优异的准确性，抗过渡电阻能力最大可达 300 Ω。所建立的故障识别方法对实际工程具有较大的参考和应用价值。

(3)所提辨识方法以故障电流特征量为核心，贯穿整个保护方案，且无需分析其他电气量，因此保护方案简洁易行。但该方案需较高的采样频率，且阈值需人工设置，后续可将人工智能算法应用于柔直输电系统中，作为进一步研究方向。

参考文献：

[1] Man Weishi, Bei Xiaoman, Zhang Zhiyu. A protection method of VSC-HVDC cables based on generalized S-transform [J]. Energy and Power Engineering, 2021, 13 (4): 1-10.

[2] 陈国华. 基于有源换相换流器的高压直流输电系统交流故障穿越策略研究[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 89-98. Chen Guohua. Research on AC fault ride-through strategy for active commutated converter based HVDC transmission system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21 (3): 89-98. (in Chinese)

[3] 刘辉, 李永康, 张淼, 等. 基于 GWO-TCN 网络的 HVDC 输电线路故障诊断[J]. 电子测量技术, 2021, 44 (22): 168-174.
Liu Hui, Li Yongkang, Zhang Miao, et al. Fault diagnosis of HVDC transmission lines based on GWO-TCN networks [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (22): 168-174. (in Chinese)

[4] 王桥梅, 吴浩, 杨杰, 等. 基于 Teager 能量算子和 1D-CNN 的 HVDC 输电线路故障识别方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 93-100.
Wang Qiaomei, Wu Hao, Yang Jie, et al. Fault identification method of HVDC transmission line based on teager energy operator and 1D-CNN [J]. Smart Power, 2021, 49(5): 93-100. (in Chinese)

[5] 胡仙清, 童宁, 林湘宁, 等. 超长距离 HVDC 线路高灵敏性主保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1172-1184, 1409.
Hu Xianqing, Tong Ning, Lin Xiangning, et al. High sensitive main protection for extra-long HVDC line [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1172-1184, 1409. (in Chinese)

[6] 马富艺龙, 辛焕海, 刘晨曦, 等. 新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5758-5770.
Ma Fuyilong, Xin Huanhai, Liu Chenxi, et al. Small-disturbance system voltage support strength assessment method for renewables VSC-HVDC delivery system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5758-5770. (in Chinese)

[7] 饶宏, 周月宾, 陈煜坤, 等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 1-14.
Rao Hong, Zhou Yuebin, Chen Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14. (in Chinese)

[8] Zheng Zheng, Tai Tai, Thorp J S, et al. A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmitssion line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2278-2285.

[9] 束洪春, 代月, 安娜, 等. 基于交叉重叠差分变换的 MMC-HVDC 线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 203-214, 226.
Shu Hongchun, Dai Yue, An Na, et al. Fault identification method of MMC-HVDC line based on sequential overlapping derivative transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 203-214, 226. (in Chinese)

[10] 安娜, 束洪春, 郭瑜, 等. 基于感性模糊识别的 MMC 直流输电线路单极接地故障分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 71-77.
An Na, Shu Hongchun, Guo Yu, et al. Single pole-to-ground fault analysis of MMC DC transmission lines based on inductance fuzzy identification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 71-77. (in Chinese)

[11] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 440-447.
Yu Xiuyong, Xiao Liye, Lin Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 440-447. (in Chinese)

[12] 杨志勇, 杨炳元, 任永峰, 等. 基于单端高频电流量 MMC-MTDC 输电线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 151-160.
Yang Zhiyong, Yang Bingyuan, Ren Yongfeng, et al. Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 151-160. (in Chinese)

[13] 李卫丰, 王超, 薛永端, 等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 1-10.
Li Weifeng, Wang Chao, Xue Yongduan, et al. A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 1-10. (in Chinese)

[14] 付华, 刘振敏, 陈浩轩, 等. 基于电流暂态量的多端柔直输电线路故障辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 107-115.

Fu Hua, Liu Zhenmin, Chen Haoxuan, et al. Fault identification of multi-terminal flexible DC transmission lines based on current transient [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 107-115. (in Chinese)

[15] 李晔, 李斌, 刘晓明, 等. 基于反向行波幅值比的对称单极柔性直流系统行波方向保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2418-2434.
Li Ye, Li Bin, Liu Xiaoming, et al. The direction protection based on the amplitude ratio of the backward traveling wave for the symmetrical monopole flexible DC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2418-2434. (in Chinese)

[16] 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.
Fu Hua, Chen Haoxuan, Li Xiuju, et al. MMC-MTDC DC side single-ended quantity fault identification method with boundary elements [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 215-226. (in Chinese)



付华

作者简介：

付华(1962—)，女，博士，教授。研究方向：电力系统故障辨识。E-mail：fxfuhua@163.com。

张辉(1999—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电力系统故障辨识。E-mail：1807684207@qq.com。

(责任编辑：耿越)



公益广告来源：中国文明网