DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191704

含边界元件的 MMC-MTDC 直流侧单端量故障辨识方法

付　华[1]　陈浩轩[1]　李秀菊[2]　陈润晶[3]

（1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院　葫芦岛　125105
2. 国网葫芦岛供电公司　葫芦岛　125100　3. 国网丹东供电公司　丹东　118000）

摘要　直流侧故障辨识是基于模块化多电平换流器（MMC）的多端直流输电（MTDC）系统急需解决的重大科学问题。分析直流线路的边界特性与极间耦合特性，提出一种基于单端暂态能量的故障辨识方法。通过区内、外故障的暂态特征以及方向元件，构建故障线路选择判据；并利用母线相连线路的方向元件和交流侧故障的暂态特性，构造母线故障识别判据；再根据两极低频电流差异，设计故障极判别判据。该方法能快速辨识直流侧故障，无需两端通信，能够满足 MMC-MTDC 系统对辨识方法速动性与选择性的要求。最后结合张北四端柔性直流系统的 PSCAD 仿真模型，验证了所提方法在不同的故障类型、故障位置和过渡电阻下均能准确检测到故障，且具备一定的抗过渡电阻能力。

关键词：故障辨识　模块化多电平换流器　多端直流输电　暂态能量　方向元件

中图分类号：TM721

MMC-MTDC DC Side Single-Ended Quantity Fault Identification Method with Boundary Elements

Fu Hua[1]　*Chen Haoxuan*[1]　*Li Xiuju*[2]　*Chen Runjing*[3]

（1. Faculty of Electrical and Control Engineering Liaoning Technical University　Huludao　125105　China
2. State Grid Huludao Power Supply Company　Huludao　125100　China
3. State Grid Dandong Power Supply Company　Dandong　118000　China）

Abstract　DC-side fault identification is the major scientific issue that needs to be solved urgently for multi-terminal DC transmission (MTDC) system based on modular multilevel converter(MMC). This paper proposed a fault identification method based on the single-ended transient energy by analyzing the boundary characteristic and inter-pole coupling characteristic of the DC line. The fault line selection criterion was constructed by the transient characteristic of the internal fault and external fault and the directional element. And the bus fault identification criterion was achieved by the directional element of the bus-connected lines and the transient characteristic of AC-side fault. Then, the fault pole discrimination criterion was designed by the low-frequency current difference between two poles. The proposed method could quickly identify the DC-side fault without communication, which could satisfy the speed and selectivity requirement of the MMC-MTDC system. At last, the Zhangbei four-port flexible DC system is built in PSCAD and the accuracy of the proposed method is verified by simulation results of different fault type, fault location and transition resistance, as well as proving that the method has

国家自然科学基金（51974151, 71771111）和辽宁省重点实验室基金（LJZS003）资助项目。
收稿日期 2019-12-06　改稿日期 2020-03-12

certain ability resisting transition resistance.

Keywords： Fault identification, modular multilevel converter, multi-terminal direct current transmission, transient energy, directional element

0 引言

随着分布式可再生新能源发展规划的推进，传统交流输电在新能源发电并网和功率输送方面存在诸多瓶颈[1]。基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电系统的运行方式经济、灵活且损耗小[2-3]，在多交流电网互联、远距离负荷供电和海上风电功率外送等方面优势突出[4-5]，为解决我国能源资源和负荷需求的逆向分布问题提供了有效的技术手段[6]。多端柔性直流系统端数多且线路阻尼小，线路故障后，多个换流站故障出力的叠加使得过电流现象突出，在几毫秒内就能危及整个电网安全[7]，尤其未来电网更趋向于架空线路输电，系统更易发生短路、闪络等瞬时性故障[8]。因此快速而有选择地辨识直流侧故障是目前急需解决的关键技术之一。

目前相关的故障辨识研究集中在基于电压源换流器的两端柔性直流系统[9]，对基于模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）的多端柔性直流系统的研究时间较短，有以下几种故障辨识方法。文献[10-11]提出基于直流线路电压变化率的辨识方法，原理简单、易于实现，但对高电阻故障的灵敏性较差且难以清晰区分故障电气量边界。文献[12]提取线路首末两端高频电压分量构成故障辨识方法。文献[13]利用小波变换提取故障电流的模极值极性来判断故障，具有较好的耐噪声能力和抗过渡电阻能力，但该类方法依赖两端通信，故障辨识速度有所降低。文献[14]利用电流的行波时间常数构成区内、外故障判据，具有很强的稳定性和一定的抗过渡电阻能力。文献[15]利用单端暂态量计算得到的等效电抗实现故障的辨识，保护速动性好，可靠性高，但提出的算法较为复杂。文献[16]根据直流电抗器的电压压降提出故障辨识方法。文献[17]利用区内、外暂态电流能量的差异，实现故障辨识，但上述方法的方向元件判据的可靠性与速动性较差。文献[18]利用小波变换和模糊 C 均值算法提取故障特征量，但未考虑过渡电阻的影响。鉴于以上原因，亟需研究一种能适用于基于模块化多电平换流器的多端直流（Modular Multilevel Converter-Multi-Terminal DC, MMC-MTDC）输电直流侧的新型故障辨识方法。

本文首先分析 MMC-MTDC 直流线路故障时的边界特性和极间电流耦合特性；并基于上述特性，提出故障线路选择、母线故障识别以及故障极判别的故障辨识方法及判据；最后在 PSCAD 搭建张北四端柔性直流系统模型，通过大量的仿真分析，证明了辨识方法的可行性。

1 MMC-MTDC 直流线路故障特性

1.1 区内、外故障边界特性分析

由于 MMC-MTDC 直流线路“低阻尼”特点[19]，发生故障后，故障电流迅速上升，其稳态值能达到数千安培[20-21]。在直流线路两端加装限流电抗器能有效限制故障电流上升[22]，继而提高电网故障穿越能力[23-24]，同时，该装置也成为直流线路的唯一物理边界。图 1 为装设限流电抗器的张北四端柔性直流电网正极示意图，其中 a、b、c、d、e、g、h、i 为各线路的电气量测点。

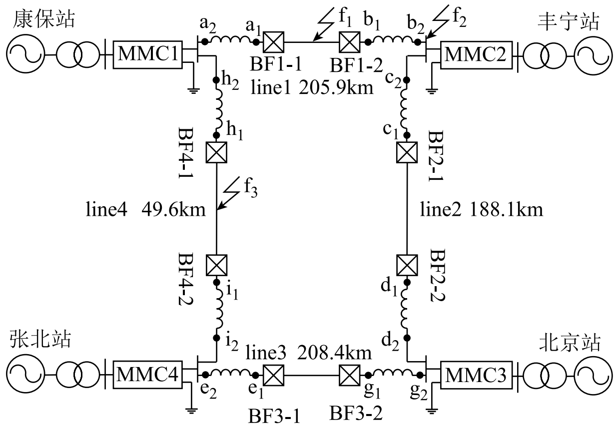


图 1 张北四端口柔性直流电网正极模型图

Fig.1 Zhangbei four-port flexible DC systern positive model

以线路 line1 的保护 BF1-1 为例，直流线路故障 f_1 为正向区内故障，母线故障 f_2 为正向区外故障，相邻直流线路故障 f_3 为反向区外故障。图 2 为故障 f_1 直流线路的等效电路。

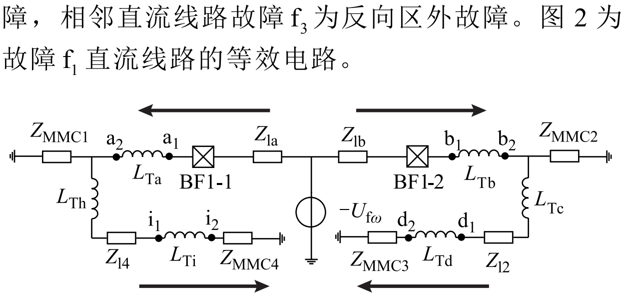


图 2 故障 f_1 直流线路等效电路

Fig.2 Fault f_1 DC transmission line equivalent diagram

图 2 中，Z_{MMC} 为换流站等效阻抗；L_{T} 为限流电抗器阻抗；Z_{la} 与 Z_{lb} 为故障点两侧线路的等效阻抗。文献[25]给出了线路电压和电流的复频域通解，即

$$\begin{cases}U(x,s)=F_1(s)\mathrm{e}^{-r(s)x}+F_2(s)\mathrm{e}^{r(s)x}\\ I(x,s)=\dfrac{F_1(s)\mathrm{e}^{-r(s)x}-F_2(s)\mathrm{e}^{r(s)x}}{Z_{\mathrm{c}}}\end{cases} \tag{1}$$

式中，$r(s)$ 为线路的传输系数；Z_{c} 为线路的波阻抗；$F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 为线路的边界条件系数。

由此可知，故障初始行波包含不同频率分量，同时受输电线路参数、行波传输距离、过渡电阻以及直流控制等影响，所以测点 a_1 和 b_1 包含丰富的高频成分。在高频段，限流电抗器将体现出极大的阻抗值，可等效为高频阻滞边界，所以测点 i_1 和 d_1 的故障高频分量远低于测点 a_1 与 b_1 的故障高频分量。因此，可利用区内、外高频暂态电流的差异，实现故障线路的选择。

1.2　极间电流耦合特性分析

当两极线路中的某极发生单极接地故障时，由于极间线路的耦合效应，健全极也将感应出故障行波，并产生较大的暂态故障分量。文献[26]根据双极直流线路的无损模型，给出了正极和负极电流耦合式，即

$$\begin{cases}-\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{p}}}{\partial x^2}=\left[-(c_0+c_{\mathrm{m}})l_0+c_{\mathrm{m}}l_{\mathrm{m}}\right]\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{p}}}{\partial t^2}+\\ \qquad\left[-(c_0+c_{\mathrm{m}})l_{\mathrm{m}}+c_{\mathrm{m}}l_0\right]\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{n}}}{\partial t^2}\\ -\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{n}}}{\partial x^2}=\left[-(c_0+c_{\mathrm{m}})l_0+c_{\mathrm{m}}l_{\mathrm{m}}\right]\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{n}}}{\partial t^2}+\\ \qquad\left[-(c_0+c_{\mathrm{m}})l_{\mathrm{m}}+c_{\mathrm{m}}l_0\right]\dfrac{\partial^2 i_{\mathrm{p}}}{\partial t^2}\end{cases} \tag{2}$$

式中，l_0、c_0 分别为输电线路单位长度电感、电容；l_{m}、c_{m} 分别为极间单位长度耦合电感、电容；i_{p}、i_{n} 分别为正、负极电流；x 为线路长度。具体参数见表 1。

表 1　输电线路单位长度参数

Tab.1　Parameter of unit length of transmission line

参　数	数　值
自感 l_0/(μH/m)	1.11
互感 l_{m}/(μH/m)	0.151
电容 c_0/(μF/m)	10.04
耦合电容 c_{m}/(pF/m)	0.037

由式（2）可知，双极输电线路另一极对本极的电流耦合作用主要体现在等式右侧第二项，即输电线路参数和另一极电流对时间的二阶导数。由表 1 参数求得式（2）等式右侧第二项的系数为1.52×10^{-12}，可知输电线路参数对极间耦合作用是非常小的，因此极间耦合作用主要由电流对时间的二阶导数决定。正常运行时，正、负极电流均为直流量，此时极间不存在耦合作用；当输电线路发生单极接地故障时，健全极将产生耦合电流，耦合程度由故障极电流对时间的二阶导数决定。故障极电流频率较高时，对时间的二阶导数较大，极间耦合作用强，此时健全极和故障极电流差别不大；故障极电流频率较低时，对时间的二阶导数较小，极间耦合作用弱，健全极电流远低于故障极。因此可利用低频电流分量进行故障极判别。

图 3 为仿真模型中的线路发生正极接地故障时，两极电流的耦合情况。可以看出，两极电流在低频下的差异要大于高频下的差异，与理论分析一致。

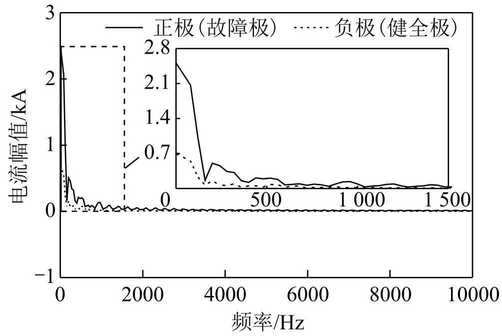


图 3　故障极与健全极电流频谱

Fig. 3　Fault pole and sound pole current spectrum

2　故障辨识方法及判据

通过第 1 节对区内、外故障边界特性和极间线路耦合特性的分析，提出含有故障线路选择、母线故障识别以及故障极判别的故障辨识方法。线路发生故障后，线路电流迅速增大，与正常运行电流有着显著的区别。为确保判据能在故障发生瞬间启动，采用电流变化率作为辨识方法启动判据，表达式为

$$\left|\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right|>\varDelta_{\mathrm{set}} \tag{3}$$

式中，i 为所测电流；$\varDelta_{\mathrm{set}}$ 为启动判据整定阈值。

2.1　暂态能量的提取

故障暂态产生的电流、电压等暂态信号蕴含着丰富的故障信息。小波包变换能同时提取故障信号的高、低频分量，既无冗余也无疏漏。设小波包分解出的第 j 层、第 k 带的重构信号为 $d_{j,k}$，在数据窗中，$d_{j,k}$ 由 N 个离散点组成，每个离散点的幅值为

$x_{j,k}^{m}$。为进一步提取故障特征，引入暂态能量对电气量的高、低频重构信号 $d_{j,k}$ 的大小进行度量。

电流或电压重构信号 $d_{j,k}$ 的暂态能量定义为

$$E_{j,k}=\sqrt{\int\left|d_{j,k}\right|^{2}\mathrm{d}t}=\sqrt{\sum_{m=1}^{N}\left|x_{j,k}^{m}\right|^{2}} \tag{4}$$

式中，$E_{j,k}$ 和 N 分别为 $d_{j,k}$ 信号的暂态能量和数据长度。

为防止稳态工频量的干扰，除选择最低频带之外，将频带最低的重构信号依照式（4）求解出的低频暂态能量作为判据。此外，为确保故障瞬间的高频暂态量被充分利用，选择最高频带的重构信号依照式（4）求解出的高频暂态能量作为判据。

2.2 故障线路选择

由 1.1 节可知，正向区外测点的高频暂态电流分量低于区内测点的高频暂态电流分量。结合 2.1 节暂态能量定义，提出排除正向区外故障的判据为

$$E_{i-\mathrm{H}}>E_{i-\mathrm{H(set)}} \tag{5}$$

式中，$E_{i-\mathrm{H}}$ 为近线路测点的高频暂态电流能量；$E_{i-\mathrm{H(set)}}$ 为判据整定的阈值。

为实现正向、反向故障的判别，以线路 line1 的 BF1-1 为对象进行分析。发生故障 f_1 瞬间，线路 line4 并未形成故障通路，由图 2 等效电路得到限流电抗器 L_{Ta} 两侧的暂态电压幅值比为

$$\left|\frac{U_{\mathrm{a1}}}{U_{\mathrm{a2}}}\right|=\left|\frac{Z_{(\omega)\mathrm{MMC1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Ta}}}{Z_{(\omega)\mathrm{MMC1}}}\right| \tag{6}$$

式中，U_{a1}、U_{a2} 分别为测点 a_1、a_2 的暂态电压；$Z_{(\omega)\mathrm{MMC1}}$、$\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Ta}}$ 分别为换流器 MMC1 和限流电抗器 L_{Ta} 在频率 ω 下的等效阻抗。

图 4 为故障 f_3 直流线路的等效电路。

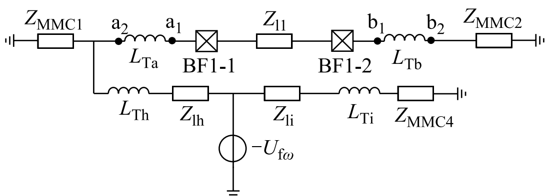


图 4 故障 f_3 线路等效电路

Fig.4 Fault f_3 line equivalent diagram

由图 4 得出限流电抗器 L_{Ta} 两侧的暂态电压幅值比为

$$\left|\frac{U_{\mathrm{a1}}}{U_{\mathrm{a2}}}\right|=\left|\frac{Z_{(\omega)\mathrm{l1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Tb}}+Z_{(\omega)\mathrm{MMC2}}}{\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Ta}}+Z_{(\omega)\mathrm{l1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Tb}}+Z_{(\omega)\mathrm{MMC2}}}\right| \tag{7}$$

以限流电抗器 L_{Ta} 为例，由式（6）、式（7）可知：发生正向故障时，测点 a_1 的暂态电压幅值高于测点 a_2 的幅值；发生反向故障时，测点 a_1 的暂态电压幅值低于测点 a_2 的幅值，且频段越高，差值越大。为提高方向元件的可靠性，采用高频暂态电压能量比值作为方向元件判据，即

$$K_{\mathrm{fx}}=\begin{cases}0(\text{正向故障}) & \dfrac{E_{u1-\mathrm{H}}}{E_{u2-\mathrm{H}}}>1\\ 1(\text{反向故障}) & \dfrac{E_{u1-\mathrm{H}}}{E_{u2-\mathrm{H}}}<1\end{cases} \tag{8}$$

式中，$E_{u1-\mathrm{H}}$、$E_{u2-\mathrm{H}}$ 分别为限流电抗器近线路侧和近母线侧的高频暂态电压能量。

当近侧母线发生正向故障时，所测高频电流能量较高，易使式（5）判据成立。例如，母线 Bus2 发生故障 f_2 时，若 BF1-1 的高频电流能量大于阈值，将“误判”该故障为区内故障。图 5 为故障 f_2 直流线路的等效电路。

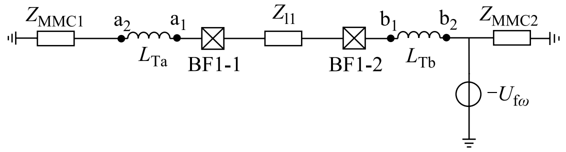


图 5 故障 f_2 线路等效电路

Fig. 5 Fault f_2 line equivalent diagram

由图 5 和图 2，推导出发生母线故障与线路故障时，测点 a_2 的电压幅值比为

$$\left|\frac{U_{\mathrm{Bus}}}{U_{\mathrm{line}}}\right|=\left|\frac{Z_{(\omega)\mathrm{MMC1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Ta}}+Z_{(\omega)\mathrm{la}}}{Z_{(\omega)\mathrm{MMC1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Ta}}+Z_{(\omega)\mathrm{l1}}+\mathrm{j}\omega l_{\mathrm{Tb}}}\right| \tag{9}$$

由式（9）可知，测点 a_2 在线路故障时的电压要高于母线故障时的电压，且在高频下该差异越明显。据此提出式（5）的辅助判据（排除正向母线故障），即

$$E_{u2-\mathrm{H}}>E_{u2-\mathrm{H(set)}} \tag{10}$$

式中，$E_{u2-\mathrm{H(set)}}$ 为辅助判据整定的阈值。

综上所述，提出含方向元件的故障线路选择判据，即

$$K_{\mathrm{fx}}=0\begin{cases}0\begin{cases}E_{i-\mathrm{H}}>E_{i-\mathrm{H(set)}}\text{且}E_{u2-\mathrm{H}}>E_{u2-\mathrm{H(set)}} & \text{区内故障}\\ E_{i-\mathrm{H}}<E_{i-\mathrm{H(set)}} & \text{正向区外故障}\end{cases}\\ 1 & \text{反向区外故障}\end{cases} \tag{11}$$

2.3 母线故障识别

母线或交流侧故障时，与母线直接相连线路的

方向元件均为反向。由于换流器内部元件对高频电压有较大的阻滞，所以在交流侧故障时近母线测点的高频电压能量值要低于母线故障时的能量值。据此提出母线故障识别判据，即

$$\begin{cases} K_{\mathrm{fx1}} \,\&\, K_{\mathrm{fx2}} = 1 \\ E_{u2-\mathrm{H}} > E_{u2-\mathrm{H(set2)}} \end{cases} \tag{12}$$

式中，K_{fx1} 和 K_{fx2} 为母线相连线路近母线端的方向元件；$E_{u2-\mathrm{H(set2)}}$ 为母线故障判据的整定阈值。

2.4　故障极判别

由于两极线路存在耦合，某极发生故障，另一极(健全极)也将感应出较大的高频暂态电流能量，仅利用故障线路选择判据将无法区分故障极。根据 1.2 节得出的结论，提出故障极判别判据。

考虑到噪声及线路电容放电的影响，为提高抗干扰能力，选择两极低频电流能量的比值作为故障极判别判据。在双极故障下，两极能量比值不一定严格为 1，引入可靠系数 $k_{\mathrm{rel}} = 2$，判据表达式为

$$\begin{cases} K_{\mathrm{xj}} > 1 \cdot k_{\mathrm{rel}} (\text{即} K_{\mathrm{xj}} > 2) & \text{正极故障} \\ K_{\mathrm{xj}} < 1/k_{\mathrm{rel}} (\text{即} K_{\mathrm{xj}} < 0.5) & \text{负极故障} \\ 1/k_{\mathrm{rel}} \leqslant K_{\mathrm{xj}} \leqslant 1 \cdot k_{\mathrm{rel}} (\text{即} 0.5 \leqslant K_{\mathrm{xj}} \leqslant 2) & \\ & \text{双极故障} \end{cases} \tag{13}$$

式中，$K_{\mathrm{xj}} = \dfrac{E_{ip-\mathrm{L}}}{E_{in-\mathrm{L}}}$，$E_{ip-\mathrm{L}}$ 为正极低频暂态电流能量，$E_{in-\mathrm{L}}$ 为负极低频暂态电流能量。

3　仿真实验

3.1　仿真系统参数

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 1 所示的张北四端 MMC 型直流电网，换流站采用双环矢量控制方式，其中丰宁站采用定直流电压控制方式，其余换流站均采用定功率控制方式。为限制故障暂态电流，需要在线路配置限流电抗器，较大的电抗值能有效降低故障电流，但会使直流系统的动态特性恶化；较小的电抗值，易造成换流站闭锁。同时，短线路的阻抗小，其故障回路的阻抗值小于长线路故障回路的阻抗值。为限制故障电流，短线路配置的限流电抗器电抗值应大于长线路的电抗值，且线路 line1、2、3 的长度差值不大，所以线路 line1、2、3 的限流电抗器的取值可保持一致。综合考虑，线路 line4 首末两端配置 300mH 的限流电抗器，其余线路配置 200mH 的限流电抗器。仿真系统主要参数见表 2。

表 2　仿真系统主要参数

Tab.2　Main parameters of the simulation system

参数	数值			
	康保	丰宁	北京	张北
交流电压/kV	500	500	220	220
直流电压/kV	±500	±500	±500	±500
换流站容量/MW	1 500	1 500	3 000	3 000
桥臂子模块数 N	200	200	200	200
桥臂电感/mH	192	192	96	96

采样频率过低时，提取的高频量频带较低，使高频能量判据的抗过渡电阻能力和可靠性有所下降，如方向判据的高频电压能量比值会随着采样频率的降低而减小，从而降低了其可靠性。采样频率过高时，虽会增强高频量判据的性能，但所提取的低频量频带较高，使两极低频电流分量的差异过小，无法满足故障极判别判据的要求。根据小波包变换原理可知，当采样频率过高时，可进行多层次变换来满足低频量判据的需求，但过多的变换层次将使判据动作速度过慢，所以变换层次不宜过多。综合考虑工程实际等因素，结合小波包变换原理和香农采样定理，确定仿真算例中的采样频率为 20kHz，进行四层小波包变换，低频量频带范围为 625~1 250Hz，高频量频带范围为 9 375~10 000Hz。

考虑到故障产生的高频量往往集中在故障瞬间且在时域上具有快速衰减的特点，为精确提取高频暂态量，故障发生时刻的电气量不能忽略。据此，数据分析窗选取故障辨识判据启动前 0.05ms（每个采样点相隔 0.05ms）至启动后的 0.95ms（共 1ms）。

3.2　辨识方法判据阈值的选取

启动判据阈值 Δ_{set} 应大于正常运行波动下的最大电流变化率。正常运行时，采样点间的电流波动低于 0.002(pu)（参考正常运行电流），即电流变化率低于 40(pu)/s。为方便建模且保留足够的灵敏性，选择模型中正常运行时电流最小的线路为参考，对电流变化率 40(pu)/s 进行整定，并将该整定值作为所有线路的启动判据阈值。其中线路 line4 正常运行时的电流最小（为 0.5kA），据此，启动判据阈值 Δ_{set} 整定为 20kA/s。

阈值 $E_{i-\mathrm{H(set)}}$ 应大于相邻线路发生正向区外故障时区内保护检测的最大高频电流能量。在线路 line1 的首端（近康保站端）、线路 1/4 处、线路 1/2 处、线路 3/4 处和末端（近丰宁站端）设置正极金属性接地故障，各线路正向保护（对线路 line1 的故障而言）的高频暂态电流能量见表 3。

表 3 各线路正向测点的高频暂态电流能量

Tab.3 High-frequency transient current energy at the forward measuring points of each line

故障位置	BF1-1$_p$	BF1-2$_p$	BF2-2$_p$	BF4-2$_p$
首端	0.011	0.007 7	0.001 7	0.000 9
线路 1/4	0.029	0.006 8	0.001 4	0.002 1
线路 1/2	0.012	0.012	0.001 5	0.003 5
线路 3/4	0.007 9	0.0278	0.002 3	0.001 5
末端	0.007 6	0.011	0.002	0.001 2

从表 3 可知，区内测点的高频电流能量要远高于正向区外测点的高频电流能量，验证了采用高频暂态电流能量来排除正向区外故障的可行性。为提高抗过渡电阻能力，取区内单极金属性接地故障最小能量值的1/2为整定值。在对称双极拓扑中，极间故障与单极接地故障的故障回路基本一致，因此按单极故障整定的阈值也完全适用于双极故障情况。

辅助判据阈值 $E_{u2\text{-H(set)}}$ 应大于正向母线故障时的高频暂态电压能量。在表 3 中的故障位置和母线 Bus1 处设置正极金属性接地故障，得到 BF1-2$_p$ 近母线测点的高频暂态电压能量，见表 4。

表 4 不同位置故障下的高频暂态电压能量

Tab.4 High-frequency transient voltage energy under different position faults

故障位置	高频暂态电压能量
首端	26.5
线路 1/4	29.7
线路 1/2	61.6
线路 3/4	64.4
末端	35
母线 Bus1	2.85

由表 4 可知，正向母线故障时的高频电压能量远低于区内故障时的能量值。为提高抗过渡电阻能力，取区内金属性单极接地故障时的最小高频电压能量的1/3为整定值。

母线判据阈值 $E_{u2\text{-H(set2)}}$ 应大于交流侧故障时的最大高频暂态电压能量。康保站正极系统发生三相交流故障，BF1-1$_p$ 近母线测点的高频电压能量为 4.2，远低于母线 Bus1 发生正极金属性接地故障所测能量 101.6，表明设置合适的阈值能直接排除交流侧故障。为提高抗过渡电阻能力，取单极金属性母线接地故障，高频暂态电压能量的1/4为整定值。

综上，各保护判据阈值选取的结果见表 5。

表 5 各保护整定的判据阈值

Tab.5 Criterion thresholds for each protection setting

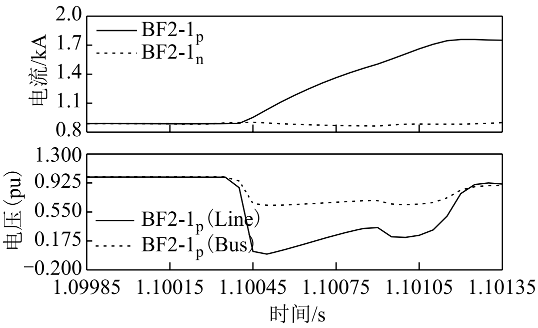
保护位置	$E_{i\text{-H(set)}}$	$E_{u2\text{-H(set)}}$	$E_{u2\text{-H(set2)}}$
BF1-1	0.003 8	9.3	25.4
BF1-2	0.003 4	8.8	25.2
BF2-1	0.003 8	4	25.2
BF2-2	0.003 3	3.9	24.9
BF3-1	0.003 5	6.3	25.3
BF3-2	0.003 2	6.9	24.9
BF4-1	0.005 5	11.6	25.4
BF4-2	0.005 5	11.2	25.3

3.3 区内故障仿真

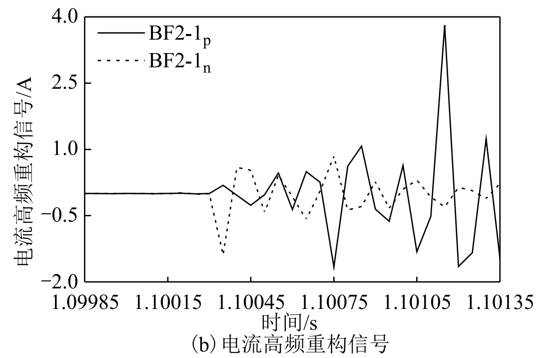
针对线路 line2 的 BF2-1 动作情况进行考察，分别设置区内单极、双极故障。

3.3.1 单极接地故障

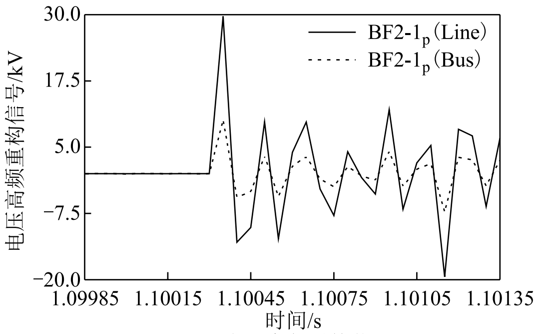
该算例在线路 line2 距丰宁站 120km 处设置正极经150Ω 过渡电阻接地故障 f$_4$，故障时刻为 $t = 1.1$s，相应的仿真结果如图 6 所示。



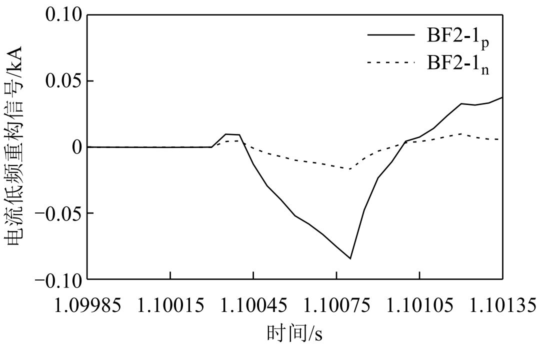
(a) 电流和电压波形



(b) 电流高频重构信号



(c) 电压高频重构信号



(d) 电流低频重构信号

图 6　故障 f4 判据动作情况

Fig.6　Fault f4 criterion action

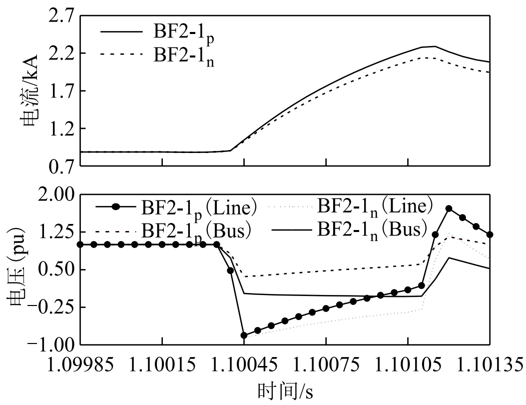
由于故障点与保护装置测量处存在一定的距离，$t=1.1\text{s}$ 故障发生后，故障行波从故障点出发，到达测量处存在延时，所以测量处电气量的变化时刻将滞后于 $t=1.1\text{s}$。由图 6a 计算可知，$t=1.100\ 4\text{s}$ 电流变化率为 80kA/s，辨识判据启动。随后故障线路选择、母线故障识别以及故障极判别等判据同步并列运行。图 6b、图 6c 中的重构信号在选取的 1ms 时间窗内，按式（4）计算可得：BF2-1_p 的 $E_{ip\text{-H}}$=0.005 5，$E_{u1p\text{-H}}$=49，$E_{u2p\text{-H}}$=17.1，由式（8）和式（11）判据可判断发生正向（$K_{fx}=0$）区内故障。此外，图 6d 中 BF2-1_p 重构信号幅值远高于 BF2-1_n 的幅值，经计算，$E_{ip\text{-L}}$=0.186，$E_{in\text{-L}}$=0.038，由式（13）判据求得 K_{xj}=4.9，为正极故障。

综上所述，确定故障 f_4 为区内正极故障。

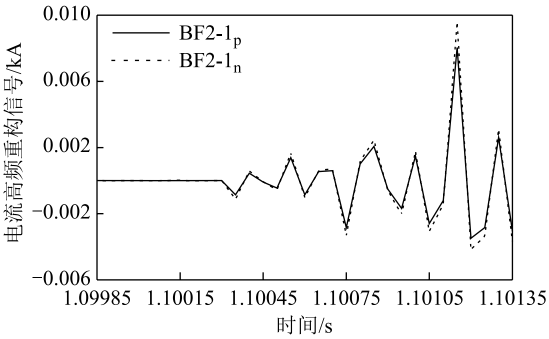
3.3.2　双极短路故障

该算例在线路 line2 距丰宁站 120km 处设置双极短路故障 f_5，故障时刻 $t=1.1\text{s}$，相应的仿真结果如图 7 所示。

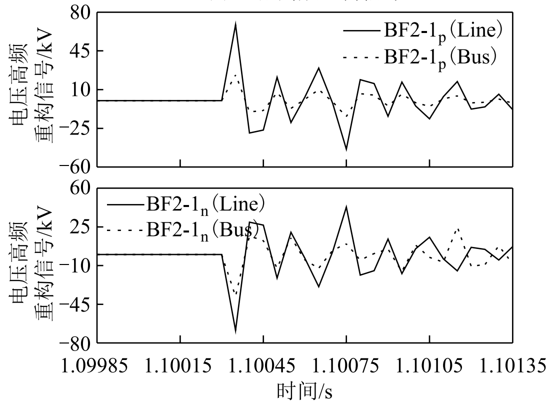
故障发生后，故障行波经一段时间传送到保护测量处，BF2-1 所测电气量波形的变化时刻滞后 $t=1.1\text{s}$。$t=1.100\ 4\text{s}$ 辨识判据启动，按式（4）求得图 7 中的各能量值，其中 BF2-1_p 的 $E_{ip\text{-H}}$=0.011 5，



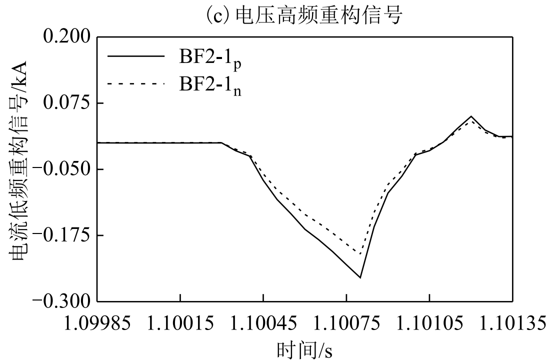
(a) 电流和电压波形



(b) 电流高频重构信号



(c) 电压高频重构信号



(d) 电流低频重构信号

图 7　故障 f5 判据动作情况

Fig.7　Fault f5 criterion action

$E_{u1p\text{-H}}$=108.6，$E_{u2p\text{-H}}$=36.9，$E_{ip\text{-L}}$=0.55；BF2-1_n 的 $E_{in\text{-H}}$=0.014，$E_{u1n\text{-H}}$=107.5，$E_{u2n\text{-H}}$=64.5，$E_{in\text{-L}}$=0.453，由式（11）、式（13）判据可判断 f_5 为正向（$K_{fxp}=K_{fxn}=0$）区内双极（K_{xj}=1.21）故障。

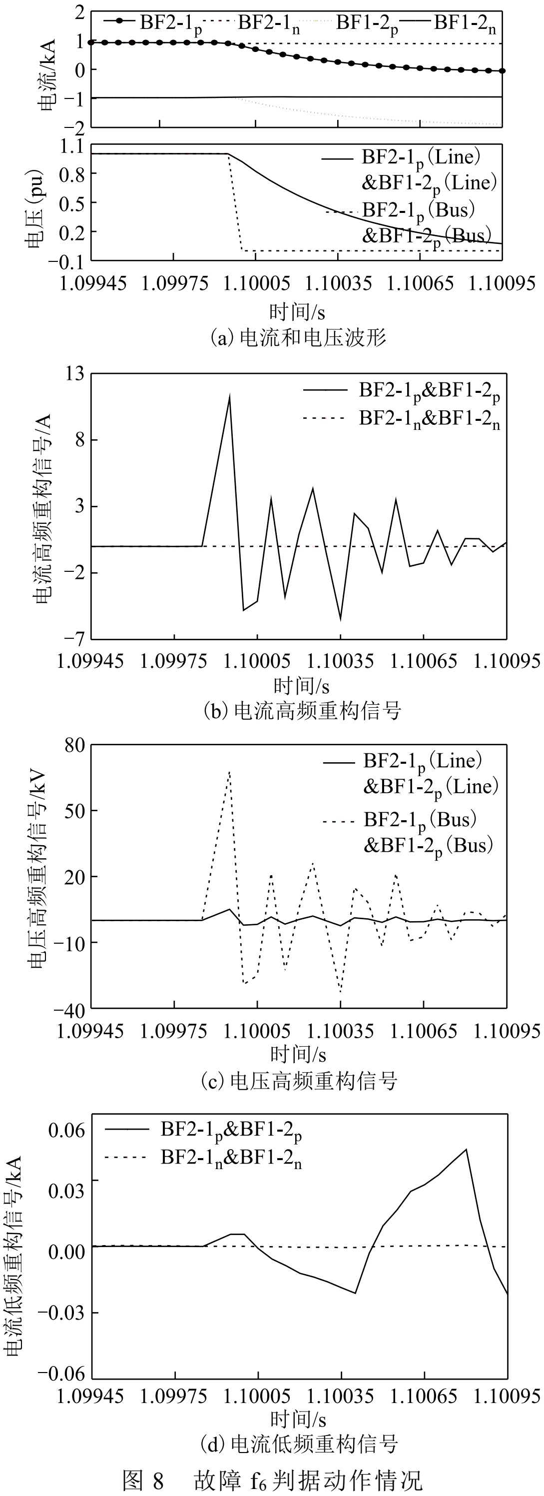
3.4　区外故障仿真

针对线路 line2 的 BF2-1 动作情况进行考察，分别设置直流母线故障、区外线路故障以及交流故障。

3.4.1　直流母线故障

该算例在母线 Bus2 处设置正极金属性接地故障 f_6，故障时刻为 $t=1.1\text{s}$，相应的仿真结果如图 8 所示。

BF1-2 与 BF2-1 的辨识判据在 $t=1.1\text{s}$ 动作。图 8b 的重构信号经计算可得，BF1-2_p 与 BF2-1_p 的高频电流能量均为 0.016 5；如图 8c 所示，近母线侧的重构信号幅值远高于近线路侧的幅值，求得 BF1-2_p



(a) 电流和电压波形

(b) 电流高频重构信号

(c) 电压高频重构信号

(d) 电流低频重构信号

图 8 故障 f_6 判据动作情况

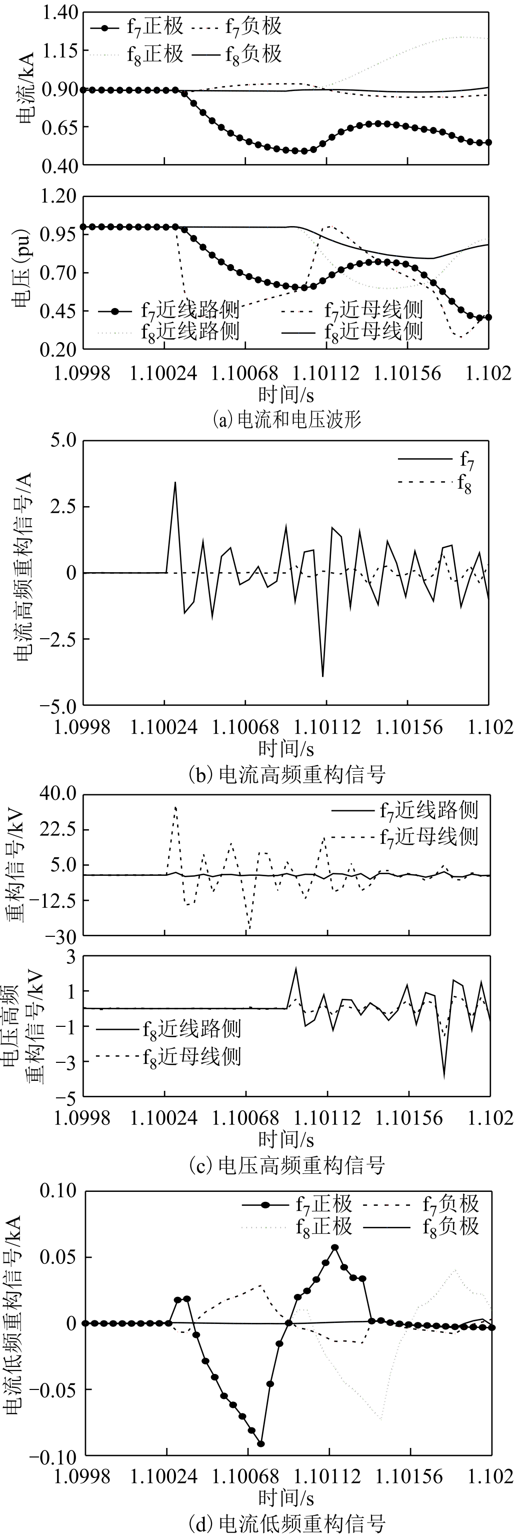
Fig.8 Fault f_6 criterion action

与 BF2-1_p 近母线侧的高频能量均为 100.6，且两者的方向判据 $K_{fx}=1$，可判别为反向故障。图 8d 中，BF1-2 与 BF2-1 的 K_{xj}=33.4，为正极故障。

BF1-2 和 BF2-1 判定为反向区外故障且近母线电压能量大于母线辨识判据阈值，可判断故障 f_6 为母线 Bus2 正极接地故障。

3.4.2 区外线路故障

该算例在线路 line1 和 line3 的中点设置正极金属性接地故障 f_7 、f_8。于 BF2-1 而言，f_7 为反向区外故障，f_8 为正向区外故障，仿真结果如图 9 所示。



(a) 电流和电压波形

(b) 电流高频重构信号

(c) 电压高频重构信号

(d) 电流低频重构信号

图 9 故障 f_7、f_8 判据动作情况

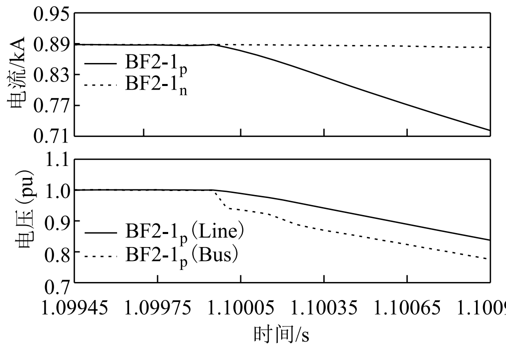
Fig.9 Fault f_7、f_8 criteria action

发生故障 f_7 时 E_{ip-H} =0.007 1，引入方向判据，得出 f_7 为反向故障（直接排除）；发生故障 f_8 时 E_{ip-H} =0.001 28，引入方向判据，得出 f_8 为正向故障，由于电流能量小于阈值，所以 f_8 为区外故障。此外，由图 9d 得出故障 f_7 和 f_8 的低频电流能量 E_{ip-Lf_7} =0.21，E_{in-Lf_7} =0.065，E_{ip-Lf_8} =0.162，E_{in-Lf_8} =0.007 7，据此可判断正极为故障极。

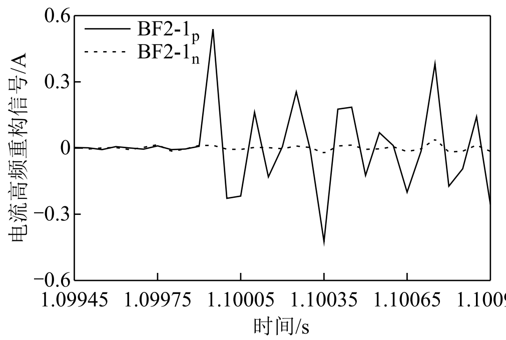
综上所述，故障 f_7 为反向区外正极故障，故障 f_8 为正向区外正极故障。

3.4.3　交流系统故障

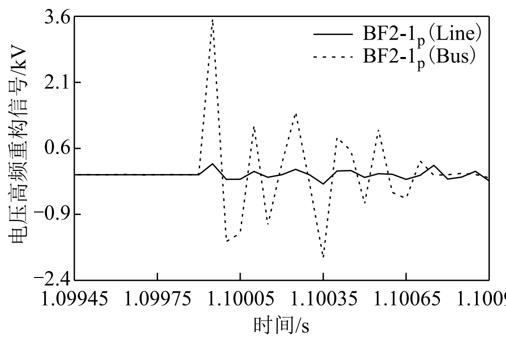
该算例在丰宁站的正极交流系统设置三相接地故障 f_9，相应的仿真结果如图 10 所示。BF2-1 的 E_{ip-H} =0.001 04，E_{u1-H} =0.52，E_{u2-H} =5.3，且正极的电流低频重构信号幅值要高于负极的幅值，可判断发生反向（K_{fx} =1）区外正极故障。此外，近母线测点的高频电压能量低于母线辨识判据阈值，可确定母线 Bus2 未发生故障。



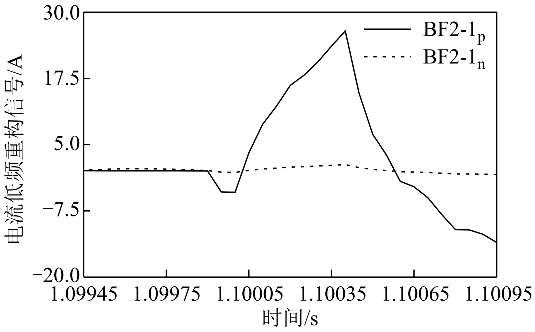
(a) 电流和电压波形



(b) 电流高频重构信号



(c) 电压高频重构信号



(d) 电流低频重构信号

图 10　故障 f_9 判据动作情况

Fig.10　Fault f_9 criterion action

3.5　辨识方法性能分析

不同的故障类型、故障位置以及过渡电阻均存在对辨识方法性能的影响。针对 BF2-1，表 6 和表 7 给出了线路 line2 和母线 Bus2 在不同故障场景下判据的动作情况。

表 6　直流线路不同场景下判据动作情况

Tab.6　Criterion actions in different scenarios of DC line

类型	位置	电阻/Ω	E_{ip-H}	E_{u2-H}	K_{fx}	K_{xj}	结果
单极接地	首端	0	0.011	35.5	0	28.9	区内正极
		100	0.008 7	28.8	0	16.1	区内正极
		250	0.006 8	22.5	0	10	区内正极
	线路 $\frac{1}{4}$	0	0.013	37	0	3.5	区内正极
		100	0.007 6	22	0	3	区内正极
		250	0.004 5	14.5	0	2.8	区内正极
	线路 $\frac{1}{2}$	0	0.009	39	0	2.9	区内正极
		100	0.005 9	22.7	0	3.7	区内正极
		250	0.004 2	14.4	0	3.1	区内正极
	线路 $\frac{3}{4}$	0	0.008 7	23	0	7.3	区内正极
		100	0.005 2	15.3	0	11.3	区内正极
		250	0.004 6	10.8	0	14.7	区内正极
	末端	0	0.007 5	12.1	0	7.8	区内正极
		100	0.005 1	10	0	5.1	区内正极
		250	0.004 3	8	0	3.1	区内正极
双极短路	首端	0	0.010 6	35	0	1.41	区内双极
	线路 $\frac{1}{4}$	0	0.014 6	38.9	0	1.38	区内双极
	线路 $\frac{1}{2}$	0	0.009 8	31.5	0	0.85	区内双极
	线路 $\frac{3}{4}$	0	0.009 5	31.3	0	1.35	区内双极
	末端	0	0.008 8	30.1	0	1.23	区内双极

由表 6 可知，在不同的故障类型、故障位置和过渡电阻下，故障辨识判据依然能正确判断出故障线路与故障极。同时，仿真结果表明，即使在过渡

电阻高达 250Ω 的情况下，依然能正确辨识，具有一定耐受过渡电阻能力。

表 7 直流母线不同场景下判据动作情况

Tab. 7 Criterion actions in different scenarios of the DC bus

类型	电阻/Ω	保护位置	$E_{ip\text{-H}}$	$E_{u2\text{-H}}$	K_{fx}	K_{xj}	结果
单极接地	100	BF1-2	0.017 1	95.7	1	93.1	Bus2 正极
		BF2-1	0.017 1	95.7	1	93.1	
	250	BF1-2	0.015	88.2	1	105	Bus2 正极
		BF2-1	0.015	88.2	1	105	
双极短路	0	BF1-2	0.016 8	81.5	1	0.89	Bus2 双极
		BF2-1	0.016 8	81.5	1	0.87	

由表 7 可知，在不同的故障类型和过渡电阻下，母线故障判据依然能够正确识别母线故障且具有较强抗过渡电阻能力。

4 结论

针对 MMC-MTDC 直流侧的线路和母线，提出故障线路选择、母线故障识别和故障极判别等判据，并结合 PSCAD/EMTDC 平台对张北四端柔性直流模型进行仿真验证，结论如下：

1）仅利用单端电气量提出故障辨识方法，无需双端数据通信，就能实现故障的辨识。

2）能在 2ms 内对直流侧可能涉及的线路故障、母线故障以及故障极完成辨识，满足 MMC-MTDC 系统快速故障辨识的要求。

3）分析了故障类型、故障位置和过渡电阻对故障辨识方法性能的影响。结果表明，所提方法具备较高的可靠性和一定的抗过渡电阻能力。

参考文献

[1] 张释中，裴玮，杨艳红，等. 基于柔性直流互联的多微网集成聚合运行优化及分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1025-1037.
Zhang Shizhong, Pei Wei, Yang Yanhong, et al. Optimization and analysis of multi-microgrids integration and aggregation operation based on flexible DC interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1025-1037.

[2] 苏见燊，郭敬东，金涛. 柔性直流电网中直流故障特性分析及线路故障重启策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 352-359.
Su Jianshen, Guo Jingdong, Jin Tao. DC fault characteristics and line fault recovery strategy in flexible DC power network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 352-359.

[3] 徐殿国，李彬彬，周少泽. 模块化多电平高压变频技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 104-116.
Xu Dianguo, Li Binbin, Zhou Shaoze. Overview of the modular multilevel converter based high voltage motor drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 104-116.

[4] 陈继开，孙川，李国庆，等. 双极 MMC-HVDC 系统直流故障特性研究[J]. 电工技术学报，2017, 32(10): 53-60, 68.
Chen Jikai, Sun Chuan, Li Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-60, 68.

[5] 陈宝平，林涛，陈汝斯，等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网系统的多频段振荡特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 1): 176-184.
Chen Baoping, Lin Tao, Chen Rusi, et al. Characteristics of multi-band oscillation for direct drive wind farm interfaced with VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 176-184.

[6] 乔立华，陶然，宋国兵，等. 直流线路边界特性保护综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
Qiao Lihua, Tao Ran, Song Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.

[7] Li Bin, He Jiawei, Tian Jie, et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 275-282.

[8] 严胜，罗湘，贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 205-216.
Yan Sheng, Luo Xiang, He Zhiyuan. Prospect of core equipment and key technology for DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 205-216.

[9] 谢志远，胡斌俞，张卫民，等. 基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 34-42.

Xie Zhiyuan, Hu Binyu, Zhang Weimin, et al. A novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 34-42.

[10] 李威，吴学光，常彬，等. 基于电压变化率故障检测的高压直流断路器保护策略[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 554-565.
Li Wei, Wu Xueguang, Chang Bin, et al. Research on protection strategy of HVDC circuit breaker based on voltage change rate fault detection[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 554-565.

[11] Sneath J, Rajapakse A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 973-981.

[12] 何佳伟，李斌，李晔，等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078.
He Jiawei, Li Bin, Li Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887, 7078.

[13] Zou Guibin, Feng Qian, Huang Qiang, et al. A fast protection scheme for VSC based multi-terminal DC grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 307-314.

[14] Saleh K A, Hooshyar A, El-Saadany E F. Ultra-high-speed traveling-wave-based protection scheme for medium-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1440-1451.

[15] Feng Xianyong, Li Qi, Pan Jiuping, et al. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1834-1840.

[16] Li Chengyu, Gole A M , Zhao Chengyong. A fast DC fault detection method using DC reactor voltages in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2254-2264.

[17] 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, 6016.
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, 6016.

[18] Hossam-Eldin A, Lotfy A, Elgamal M, et al. Artificial intelligence-based short-circuit fault identifier for MT-HVDC systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2436-2443.

[19] 周海鸿，杨明发，阮俊峰. MMC-HVDC 输电系统直流故障隔离综述[J]. 电气技术, 2019, 20(1): 1-6.
Zhou Haihong, Yang Mingfa, Ruan Junfeng. Summarization of DC fault isolation in MMC-HVDC transmission system[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(1): 1-6.

[20] Xue Shimin, Lian Jie, Qi Jinlong, et al. Pole-to-ground fault analysis and fast protection scheme for HVDC based on overhead transmission lines[J]. Energies, 2017, 10(7): 1059-1075.

[21] 尹太元，王跃，段国朝，等. 基于零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 343-351.
Yin Taiyuan, Wang Yue, Duan Guozhao, et al. Zero DC voltage control based DC fault ride-through strategy for hybrid modular multilevel converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 343-351.

[22] 朱思丞，赵成勇，许建中. 含多类型故障限流设备动作的直流电网保护时序配合[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 195-207.
Zhu Sicheng, Zhao Chengyong, Xu Jianzhong. Time-sequence coordination of protection in DC grid with multi-type fault current limiting devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 195-207.

[23] Li Rui, Xu Lie, Holliday D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.

[24] 汤兰西，董新洲. MMC 直流输电网线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498, 646.
Tang Lanxi, Dong Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498, 646.

[25] 宁连营, 邰能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220.
Ning Lianying, Tai Nengling, Zheng Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017, 5220.

[26] 褚旭, 王亮, 王华伟, 等. 高压直流输电线路极间耦合影响及故障选极方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 140-146.
Chu Xu, Wang Liang, Wang Huawei, et al. Analysis of inter-pole coupling effect and faulty pole selection for HVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 140-146.

作者简介

付 华 女，1962 年生，博士，教授，研究方向为电力系统故障辨识。
E-mail：fxfuhua@163.com

陈浩轩 男，1995 年生，硕士研究生，研究方向为电力系统故障辨识。
E-mail：307498701@qq.com（通信作者）

（编辑 赫蕾）

（上接第 214 页）

[21] 薛英林, 徐政, 张哲任, 等. MMC-HVDC 换流器阻抗频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4040-4048.
Xue Yinglin, Xu Zheng, Zhang Zheren, et al. Analysis of impedance frequency characteristics of MMC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4040-4048.

[22] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
Zhao Chengyong, Chen Xiaofang, Cao Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.

[23] Dina Mourad Hafez, Elsayed Hassan Shehab Eldin, Abdu Aziz Mahmoud Abdu Alaziz. A novel unit protective relaying concept based on current signal sequential overlapping derivative transform: Two sides fed transmission line application[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2012, 3(3): 267-277.

[24] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西, 等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 184-191.
Dong Xinzhou, Lei Aoyu, Tang Xilan, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.

作者简介

束洪春 男，1961 年生，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及 DSP 应用等。
E-mail: kmshc@sina.com.cn

安 娜 女，1985 年生，博士研究生，研究方向为输变电设备及自动化。
E-mail: anna073000@163.com（通信作者）

（编辑 郭丽军）