DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.255 **中图分类号**：TM721.1 **文献标志码**：A

基于 Canberra 距离的柔性直流电网故障保护方法

杨湛晔[1,2]，韦延方[3]，赵靖雯[4]，王 鹏[5]，曾志辉[3]

(1.海南海控能源股份有限公司，海口 570125；2.海南绿色能源与环境工程技术研究院，海口 570125；3.河南理工大学电气工程与自动化学院，焦作 454003；4.国网河南省电力公司超高压公司，郑州 450000；5.国网河南省电力公司电力科学研究院，郑州 450052)

摘要：柔性直流配电网具有故障电流上升速度快且幅值高等特点，因此，直流线路故障的快速可靠识别是直流配电网亟需突破的关键技术。针对现有柔性直流电网单端保护选择性差、多端保护速动性差的问题，提出一种基于 Canberra 距离的柔性直流电网故障保护方法。首先，根据柔性直流电网发生区内、外故障时双端电流微分正负极性的差异性，引入 Canberra 距离计算线路两端采样的故障电流微分的极性相似度，以此来进行故障区域的诊断；其次，根据故障发生时故障线与非故障线的故障特征，利用两极线路电流微分的数值差异性构造比值来进行故障选极；最后，设置不同的故障情况，验证该方法对于不同工况的适用性。仿真结果表明：该保护方案在不同故障位置、不同限流电抗及不同过渡电阻下均能实现正确故障定位和选极。

关键词：柔性直流电网；故障电流微分；Canberra 距离；故障识别；区域诊断

Fault Protection Method for Flexible DC Power Grid Based on Canberra Distance

YANG Zhanye[1,2], WEI Yanfang[3], ZHAO Jingwen[4], WANG Peng[5], ZENG Zhihui[3]

(1. Hainan Holdings Energy Co., Ltd., Haikou 570125, China; 2. Hainan Institute of Green Energy and Environmental Engineering Technology, Haikou 570125, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 4. Ultra High Voltage Company, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 5. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The flexible DC distribution network has characteristics such as a fast rising speed and a large amplitude of fault current. Therefore, the fast and reliable identification of DC line faults is a key technology that the DC distribution networks urgently need to break through. Aimed at the problems of poor selectivity of single-end protection and a slow speed of multi-end protection in the existing flexible DC power grids, a fault protection method for flexible DC power grid based on the Canberra distance is proposed. First, according to the difference in polarity of current differential between the two terminals under internal and external faults in the flexible DC power grid, the Canberra distance is introduced to calculate the polarity similarity of fault current differential sampled at both ends of the line, so as to perform diagnosis of the fault area. Second, based on the fault characteristics of fault and non-fault lines at the time of fault occurrence, a ratio is formulated using the numerical difference in current differential between the two poles, thus selecting the fault pole. Finally, different fault scenarios are set to verify the applicability of the proposed method under different working conditions. Simulation results show that the proposed protection scheme can achieve correct fault location and pole selection under the conditions of different fault locations, different values of current-limiting reactance and different transition resistances.

Keywords: Flexible DC power grid; fault current differential; Canberra distance; fault identification; regional diagnosis

收稿日期：2024-05-31；**修回日期**：2024-07-31；**录用日期**：2024-08-13；**网络首发日期**：2024-08-22

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52177114)；海南省自然科学基金资助项目(521RC1110)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52177114; Hainan Provincial Natural Science Foundation of China under the grant 521RC1110

规模化清洁能源电力传输、大容量高效变流等方面需求的日益突出，给传统的交流电网输配电技术带来了重大挑战，柔性直流输电因其在大规模新能源并网等领域的优势受到了众多学者的广泛关注[1-3]。柔性直流电网具有传输容量大、输电距离远、线路损耗低等优点，由于其阻尼小、故障发展速度快，几毫秒就能对整个电网造成损害，故直流线路继电保护技术是其面临的重要技术挑战之一[4-6]。

现有的柔性直流电网单端保护动作速度快，但也存在较多缺点，如对过渡电阻的耐受性差，保护灵敏度、可靠性还有待提高，保护范围可能存在死区问题。然而，双端保护对于区内故障具有绝对的选择性和较高的可靠性。文献[7]利用双端行波波形的余弦相似度提出了一种纵联保护方法，此保护原理需传输两端的行波数据，对通信通道要求高；文献[8]利用最小二乘法拟合线路两端的电流斜率，并根据其正负值来判断区内、外故障；文献[9]根据线路两端电流微分状态量来进行区内、外的故障诊断，不需要严格的数据同步，但对过渡电阻的耐受性较差；文献[10]提出一种改进的编辑距离算法，能够实现线路两端故障行波波形相似度的精确计算；文献[11]利用线路两端电流的 Toeplitz 矩阵形式计算的突变特征量差值进行故障区段定位，该方法速动性较好，但对过渡电阻和噪声的耐受性较差。

本文以基于模块化多电平换流器 MMC (modular multilevel converter) 的四端柔性直流电网为研究对象，详细分析了该系统线路发生区内、外故障时的电流微分极性特性，并据此提出了一种基于 Canberra 距离的柔性直流电网故障保护方法。该方法利用电流突变时 Toeplitz 矩阵形式的突变特征量设置阈值，构成故障启动模块，对线路两端电流微分信号计算 Canberra 距离值，构成区内、外故障判据，并进一步利用正、负极电流微分之比构成故障选极判据。仿真结果表明，本文所提方法在速动性与可靠性方面效果良好。

1 柔性直流电网故障特征分析

1.1 拓扑结构

本文以基于四端 MMC 的柔性直流电网为研究对象，拓扑结构如图 1 所示，MMC1~MMC4 为四端口换流站，其中MMC1为定直流电压控制，MMC2~MMC4 为定有功功率控制；L_{p1}~L_{p16} 为限流电抗器，可限制故障电流的快速增大，为直流线路的故障保护赢得时间；f_1、f_2、f_3、f_4 分别为区内单极接地故障、区内极间故障、正向区外故障和反向区外故障。

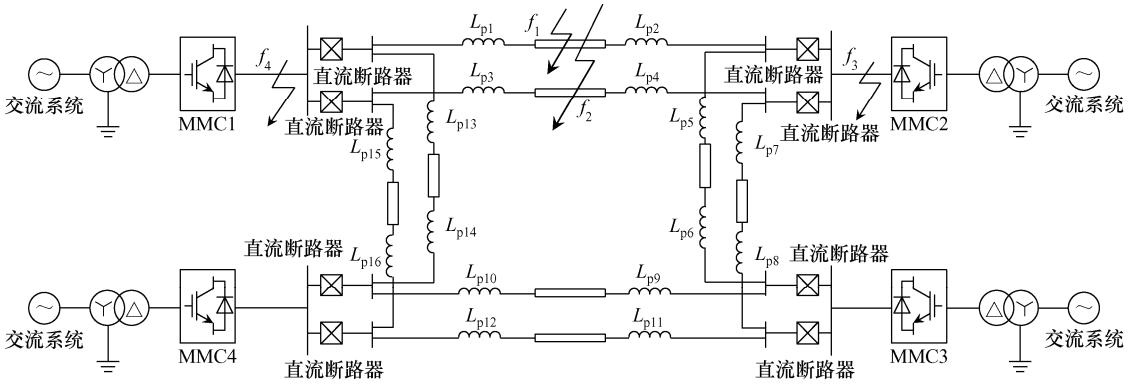


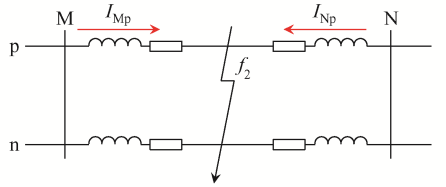
图 1 柔性直流电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of flexible DC power grid

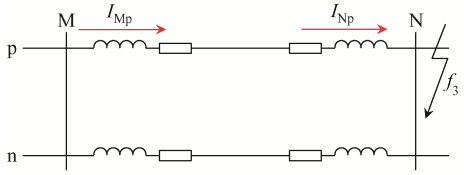
1.2 区内、外故障电流微分特征分析

若要柔性直流电网保护满足速动性，则需在电容放电的最初阶段对故障进行检测和识别。故本文将在电容放电的第一阶段对故障电流微分

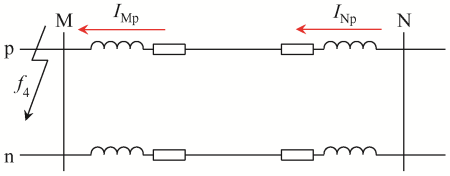
的特征进行分析，规定电流的正方向为母线到线路，不同故障时的故障电流方向如图 2 所示。以故障 f_2 为例，如图 2(a)所示，I_{Mp} 和 I_{Np} 分别为正极线路 M、N 两侧的故障电流，均为正方向。



(a) 区内极间故障



(b) 正向区外故障



(c) 反向区外故障

图 2　不同故障时故障电流方向

Fig. 2 Fault current directions under different faults

若故障电流方向突变为正，则微分极性同为正；突变为负，则微分极性同为负。综上所述，可通过故障时单极线路 M、N 两端电流微分的极性异、同对故障区域进行识别。

1.3 故障特征分析

直流电网发生单极接地短路故障时，系统正、负极不对称，利用解耦矩阵[12]将正、负极电气量转化为对称的正序、零序分量，具体为

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_p \\ e_n \end{bmatrix} \tag{1}$$

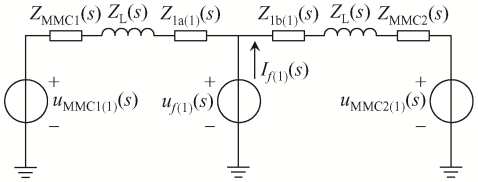
式中：e_0、e_1 分别为零序、正序分量；e_p、e_n 分别为正、负极电气量。

柔性直流电网发生正极接地故障时，将直流电网分解为正序、零序网络[13]，如图 3 所示，图中各变量请参阅文献[14-16]。由此可得两极线路的正、负极故障电流 $I_p(s)$和 $I_n(s)$分别为

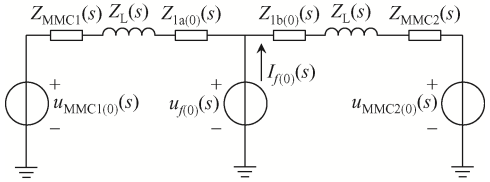
$$\begin{cases} I_p(s) = \dfrac{u_{MMC1(1)}(s)}{[Z_L(s)+Z_{MMC1}(s)][Z_{(0)eq}(s)+Z_{(1)eq}(s)]} \cdot \\ \qquad \left[\dfrac{Z_{lb(1)eq}(s)}{Z_{la(1)eq}(s)+Z_{lb(1)eq}(s)} + \dfrac{Z_{lb(0)eq}(s)}{Z_{la(0)eq}(s)+Z_{lb(0)eq}(s)}\right] \\ I_n(s) = \dfrac{u_{MMC1(1)}(s)}{[Z_L(s)+Z_{MMC1}(s)][Z_{(0)eq}(s)+Z_{(1)eq}(s)]} \cdot \\ \qquad \left[\dfrac{Z_{lb(1)eq}(s)}{Z_{la(1)eq}(s)+Z_{lb(1)eq}(s)} - \dfrac{Z_{lb(0)eq}(s)}{Z_{la(0)eq}(s)+Z_{lb(0)eq}(s)}\right] \end{cases} \tag{2}$$

式中：$Z_{(1)eq}(s)$、$Z_{(0)eq}(s)$为正序、零序网络的等值阻抗；$Z_{la(1)eq}(s)$、$Z_{la(0)eq}(s)$和 $Z_{lb(1)eq}(s)$、$Z_{lb(0)eq}(s)$分别为正极线路故障点与 MMC1、MMC2 之间的等值正序、零序阻抗；$Z_L(s)$为限流电抗器阻抗。各等值阻抗的关系为

$$\begin{cases} Z_{la(1)eq}(s) = Z_{la(1)eq}(s) + Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) \\ Z_{lb(1)eq}(s) = Z_{lb(1)eq}(s) + Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) \\ Z_{(1)eq}(s) = Z_{la(1)eq}(s) \,//\, Z_{lb(1)eq}(s) \\ Z_{(0)eq}(s) = Z_{la(0)eq}(s) \,//\, Z_{lb(0)eq}(s) \\ Z_{la(0)eq}(s) = Z_{la(0)eq}(s) + Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) \\ Z_{lb(0)eq}(s) = Z_{lb(0)eq}(s) + Z_{MMC1}(s) + Z_L(s) \end{cases} \tag{3}$$



(a) 正极接地故障的正序网



(b) 正极接地故障的零序网

图 3　正极接地故障的序网络

Fig. 3 Sequence network under positive-pole grounding fault

根据电路中拉普拉斯变换的微分性质可得正、负极电流微分的拉普拉斯变换式分别为

$$\begin{cases}\mathcal{L}\left(\mathrm{d}i_{\mathrm{p}}(t)/\mathrm{d}t\right)=sI_{\mathrm{p}}(s)-i_{\mathrm{p}}(0)\\ \mathcal{L}\left(\mathrm{d}i_{\mathrm{n}}(t)/\mathrm{d}t\right)=sI_{\mathrm{n}}(s)-i_{\mathrm{n}}(0)\end{cases} \tag{4}$$

式中，i_{p}、i_{n} 分别为正、负极电流。

由于单极接地短路时故障电流瞬间增大，故故障发生前的故障电流可忽略不计，再根据式(4)可得，故障极(正极)与健全极(负极)在故障期间两者的电流微分的拉普拉斯变换的比值为

$$\begin{aligned}\frac{\mathcal{L}[\mathrm{d}i_{\mathrm{p}}(t)/\mathrm{d}t]}{\mathcal{L}[\mathrm{d}i_{\mathrm{n}}(t)/\mathrm{d}t]}=\frac{sI_{\mathrm{p}}(s)}{sI_{\mathrm{n}}(s)}=1+2Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(1)eq}}(s)+\\ Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)]/\{Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(0)eq}}(s)+Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)]-\\ Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(1)eq}}(s)+Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)]\}\end{aligned} \tag{5}$$

由于输电线路的零序阻抗大于正序阻抗，即式(5)中 $2Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(1)eq}}(s)+Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)]/\{Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(0)eq}}(s)+Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)]-Z_{\mathrm{lb(0)eq}}(s)[Z_{\mathrm{la(1)eq}}(s)+Z_{\mathrm{lb(1)eq}}(s)]\}\gg 0$，因此可知式(5)中 $\dfrac{I_{\mathrm{p}}(s)}{I_{\mathrm{n}}(s)}>1$，经过拉普拉斯反变换后可得

$$\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{p}}(t)/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}i_{\mathrm{n}}(t)/\mathrm{d}t}\gg 1 \tag{6}$$

由式(6)可知，当发生区内单极接地故障时，故障极和健全极的电流微分比值远大于 1；当发生极间故障时，直流侧并联电容向故障点放电，正、负极电气量对称，故障点只存在正序分量而无零序分量，正、负极故障电流微分值相等，即故障极和健全极的电流微分比值等于 1。因此，可利用正、负极电流微分的比值来实现故障极的判别。

2 Toeplitz 矩阵

Toeplitz 矩阵在图像处理、数字信号处理方面效果良好[17-19]。为了使电流的突变更加明显并便于计算，可利用 Toeplitz 矩阵将一维数组转化为二维矩阵，并通过矩阵的梯度，完成此突变特征的数值化处理。电流信号 $\boldsymbol{I}=[i_1\ \ i_2\ \ i_3\cdots\ i_N]$ 的 Toeplitz 矩阵形式为

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}i_1 & i_2 & i_3 & \cdots & i_N\\ i_2 & i_1 & i_2 & \cdots & i_{N-1}\\ i_3 & i_2 & i_1 & \cdots & i_{N-2}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ i_N & i_{N-1} & i_{N-2} & \cdots & i_1\end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}$ 为根据一维电流信号 $\boldsymbol{I}$ 构造的二维 Toeplitz 矩阵。该矩阵内的元素均为信号 $\boldsymbol{I}$ 提供，其特点为：矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}$ 是对称阵，主对角线元素均为 i_1；平行于主对角线且相邻的两条对角线元素均为 i_2，以此规律类推得出整个矩阵。

根据矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}$ 得到行、列向量的表达式，计算纵向和横向的梯度，反映矩阵内相邻元素间的变化程度。$\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{I}_1\ \boldsymbol{I}_2\ \boldsymbol{I}_3\cdots\boldsymbol{I}_N]^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{I}_1\ \boldsymbol{I}_2\ \boldsymbol{I}_3\cdots\boldsymbol{I}_N]$ 分别为列、行向量的表达式，将目标行向量与相邻向量做差分运算，求得矩阵的横向梯度；同理，将目标列向量与相邻向量做差分运算，求得矩阵的纵向梯度。矩阵的横向梯度矩阵 $\boldsymbol{G}_x$ 和纵向梯度矩阵 $\boldsymbol{G}_y$ 的表达式分别为

$$\boldsymbol{G}_x=\left[\frac{\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{I}_2}{1}\ \ \frac{(\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{I}_1)+(\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{I}_3)}{2}\ \ \frac{(\boldsymbol{I}_3-\boldsymbol{I}_2)+(\boldsymbol{I}_3-\boldsymbol{I}_4)}{2}\ \ \cdots\ \ \frac{\boldsymbol{I}_N-\boldsymbol{I}_{N-1}}{1}\right] \tag{8}$$

$$\boldsymbol{G}_y=\left[\frac{\boldsymbol{I}_1^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_2^{\mathrm{T}}}{1}\ \ \frac{(\boldsymbol{I}_2^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_1^{\mathrm{T}})+(\boldsymbol{I}_2^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_3^{\mathrm{T}})}{2}\ \ \frac{(\boldsymbol{I}_3^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_2^{\mathrm{T}})+(\boldsymbol{I}_3^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_4^{\mathrm{T}})}{2}\ \ \cdots\ \ \frac{\boldsymbol{I}_N^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{I}_{N-1}^{\mathrm{T}}}{1}\right]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

矩阵的突变特征值 G 为横向梯度和纵向梯度之和，具体为

$$G=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left(\left|\boldsymbol{G}_x(i,j)\right|+\left|\boldsymbol{G}_y(i,j)\right|\right) \tag{10}$$

3 Canberra 距离

Canberra 距离作为一种经典的度量方法，在基于精确数的图像处理、模式识别等领域得到了广泛的应用。根据第 1.2 节对区内、外故障时线路两端电流微分的极性分析，可将故障电流微分极性和 Canberra 距离 $d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ 结合，构造故障判据，$d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ 的表达式为

$$d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\sum_{i=1}^{n}\frac{|x_i-y_i|}{|x_i|+|y_i|} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 均为实向量；x_i、y_i 分别为线路 M 和线

路 N 端的电流微分采样值，$x_i \in \boldsymbol{x}=\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$，$y_i \in \boldsymbol{y}=\{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$。

由式(11)可知：当 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})=0$ 时，各数据 x_i、y_i 完全相同，向量 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 具有正相关性；当 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})=1$ 时，各数据 x_i、y_i 完全相反，向量 $\boldsymbol{x}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 具有负相关性。对区内、外故障时线路两端的故障电流进行采样，并利用式(11)计算 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$。

4　故障保护算法与方案

4.1　保护启动判据

对柔性直流电网故障时的电流特性进行分析，线路故障和非故障时的电流差异性较大，故利用电流变化率结合 Toeplitz 矩阵的突变特征值构成本文方法的启动模块，判据表达式为

$$G > G_{\text{set}} \tag{12}$$

式中：G 为依据实时电流计算的 Toeplitz 矩阵突变特征值；G_{set} 为启动判据阈值。为了保证启动判据的灵敏性，应选取各条线路 Toeplitz 矩阵的突变特征值的最小值作为启动判据的整定阈值，结合本文模型仿真结果并考虑裕度，模型的 G_{set} 设置为 1 000。

4.2　故障区域识别判据

根据第 1.2 节的分析可知，区内故障时线路两端的电流微分极性相同，区外故障时线路两端的电流微分极性相反。可利用 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ 计算线路两端故障电流微分的极性相似度来进行区内、外故障的识别，具体为

$$\begin{cases} d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) < d_{\text{set}} & \text{区内故障} \\ d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) > d_{\text{set}} & \text{区外故障} \end{cases} \tag{13}$$

式中，d_{set} 为区分区内、外故障的 Canberra 距离阈值。

考虑一定裕度的情况下，d_{set} 取 0.5 较为合理。根据式(13)判定，发生区内故障时保护动作，区外故障则保护不动作。本文方法是利用线路两端电流微分计算出的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ 来判断故障区域的。由式(11)可得出，区外故障时的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ 在数值上接近于 1，区内故障时的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ 在数值上接近于 0。据此特点，本文进行了大量测试验证。

对区内、外故障仿真计算得到的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ 分别取平均值得出，区内、外故障的平均值分别为 0.102 5 和 0.807 7，二者的平均值为 0.455 1，本文进行了小数位数选取的处理，故 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})=0.5$。此阈值 0.5 是通过本文模型进行大量仿真测试并考虑一定裕度得到的。综上，若计算得到的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})>0.5$，则判断为区外故障；若计算得到的 $d(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})<0.5$，则判断为区内故障。

4.3　故障选极判据

由第 1.3 节可知，区内单极接地故障时，故障极和健全极的电流微分比值远大于 1；极间故障时，由于正、负极电气量对称，故障点不存在零序分量，因此正、负极的故障电流微分相等，比值为 1。据此特点本文进行了大量测试验证，并考虑一定的裕度，该值一般可设为略大于 1，本文设置可靠系数 λ_{set} 为典型值 1.2，即发生区内正极接地故障时，固定时间窗内电流微分拉普拉斯变换总量的比值(选极制据)$R>1.2$；发生极间故障时，$0.8<R<1.2$；发生负极接地故障时，$R<0.8$。可根据计算所得的 R 大小来实现故障极的判别，其判别式为

$$\begin{cases} R > \lambda_{\text{set}} (R > 1.2) & \text{正极故障} \\ R < 1/\lambda_{\text{set}} (R < 0.8) & \text{负极故障} \\ 1/\lambda_{\text{set}} < R < \lambda_{\text{set}} (0.8 < R < 1.2) & \text{极间故障} \end{cases} \tag{14}$$

R 的表达式为

$$R = \frac{K_{\text{p}}}{K_{\text{n}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} i_{\text{p}}(n) - i_{\text{p}}(n-1)}{\sum_{i=1}^{n} i_{\text{n}}(n) - i_{\text{n}}(n-1)} \tag{15}$$

式中：K_{p}、K_{n} 分别为正、负极电流微分的拉普拉斯变换值在固定时间窗内的和；n 为时间窗内的采样点个数。综上，本文保护方法的流程如图 4 所示。

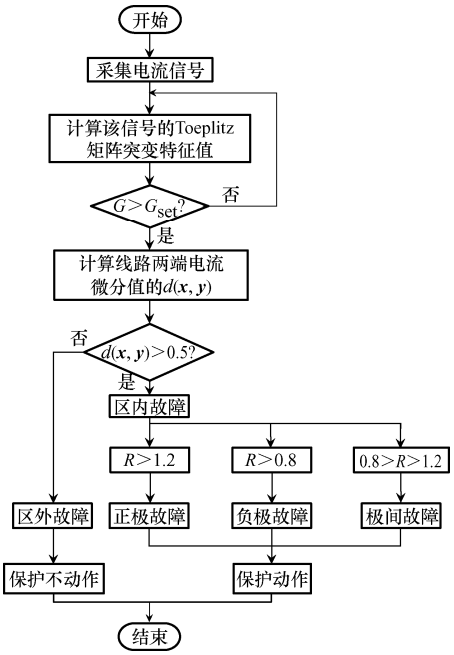


图 4 保护流程

Fig. 4 Flow chart of protection

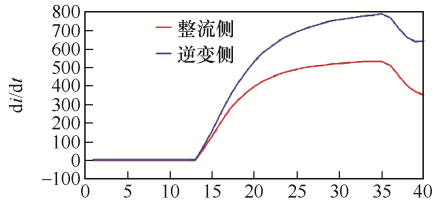
5 仿真实验

借助 Simulink 仿真平台搭建如图 1 所示的四端柔性直流电网，直流线路均装设限流电抗器。系统的采样频率设置为 20 kHz，故障时间设置为 6.5 s，故障持续时间为 0.05 s，保护所需数据窗长度为 2.0 ms。

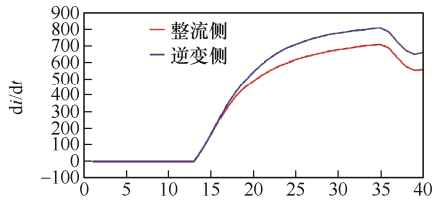
5.1 故障仿真验证

5.1.1 区内、外故障仿真

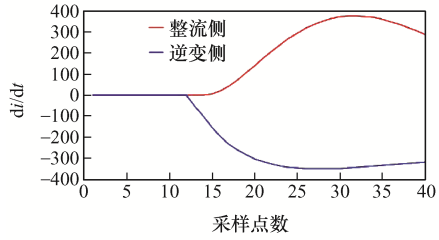
取故障发生后 2 ms 内的数据点，线路两端的采样故障电流微分如图 5 所示。



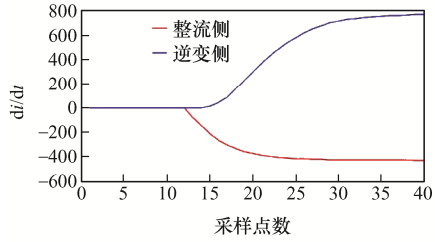
(a) 区内单极接地故障



(b) 区内极间故障



(c) 正向区外故障



(d) 反向区外故障

图 5 不同故障的电流微分

Fig. 5 Current differential under different faults

由图 5(a)和(b)可知，区内故障时，线路两端的故障电流微分极性相同，计算得到单极接地故障时的 $d(x,y)$=0.217 6、极间短路故障时的 $d(x,y)$=0.113 3，均小于设置的阈值 0.5，判定为区内故障；由图 5(c)和(d)可知，发生区外故障时，线路两端的故障电流微分极性相反，计算得到正、反向区外故障的 $d(x,y)$ 分别为 0.863 7 和 0.882 2，均大于设置的阈值 0.5，判定为区外故障。

为进一步探究本文方法对不同工况区内、外故障判定的准确性，设置区外故障在整流站和逆变站出口位置、区内故障分别在不同距离保护安装处，不同接地电阻的判别结果如图 6 所示。由图 6(a)可知，在 2 ms 时间窗内，柔性直流电网发生区内故

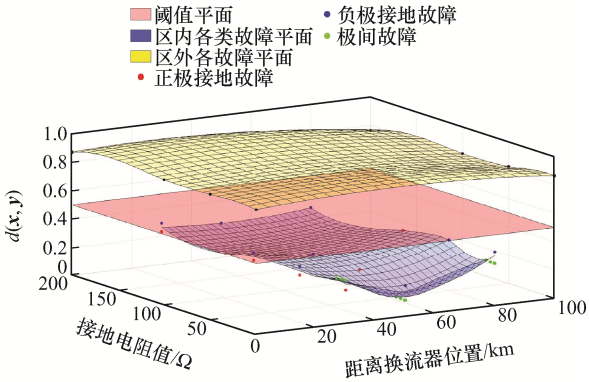


图 6 故障区域判别结果

Fig. 6 Fault areas discrimination results

障时，由线路两端电流微分计算得出的 $d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$<0.5；区外故障时计算的 $d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$>0.5。这验证了本方法在不同过渡电阻、不同故障位置均能可靠识别区内、外故障。

5.1.2　故障选极仿真

当故障被判定为区内后，需计算 R 对故障极进行识别，如图 7 所示，在 2.0 ms 时间窗内，正极故障时，R>1.2；负极故障时，R<0.8；极间故障时，0.8<R<1.2。本保护方案在不同工况下均能正确判断故障极。

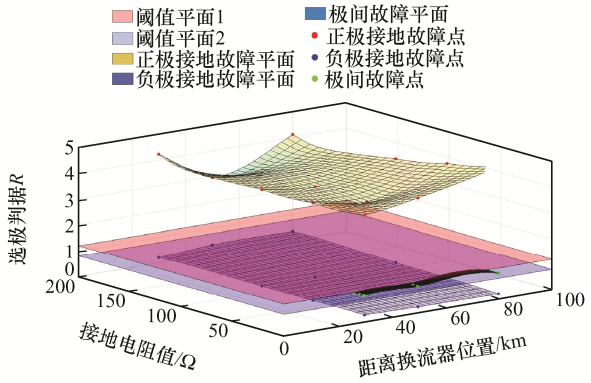


图 7　故障判别结果

Fig. 7 Fault poles discrimination results

5.1.3　高阻工况仿真

极间故障通常为金属性短路，过渡电阻较小。故本文重点分析区内单极高阻接地故障时的保护动作情况，设置过渡电阻分别为 300、400、500 Ω，计算此时线路两端电流微分的 $d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$和 R，结果见表 1。

表 1　区内单极高阻接地故障判别结果

Tab. 1 Discrimination results of single-pole high-resistance grounding fault within the area

故障类型	故障电阻/Ω	$d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$	R	故障判别结果
区内正极接地故障	300	0.352 9	4.023 3	区内正极
	400	0.385 6	3.874 5	区内正极
	500	0.412 0	3.700 7	区内正极
区内负极接地故障	300	0.382 3	0.374 0	区内负极
	400	0.373 0	0.416 1	区内负极
	500	0.362 8	0.460 3	区内负极

过渡电阻的增大会导致线路两端短路电流的变化，从而影响故障电流的微分，但本文利用线路两端故障电路微分的正负极性进行整定，受到的影响较小。由表 1 可知，本文方法对高阻具有一定的适应能力。

5.2　通信延时影响

直流输电线路采用架空线路，架空线路的信号传输速度为 3×10^8 m/s，线路长度为 100 km，理想情况下线路两端的通信延时约为 0.30 ms。为测试延时对本方法的影响，分别设置通信延时为 0.30、0.35 和 0.40 ms，计算结果见表 2。由表 2 可知，本文方法在一定的通信延时下能有效识别区内、外故障。

表 2　不同通信延时的故障判别结果

Tab. 2 Discrimination results of faults with different communication delays

故障类型	通信延时/ms	$d(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$	故障判别结果
正向区外故障	0.30	0.710 8	区外
	0.35	0.692 3	区外
	0.40	0.674 1	区外
反向区外故障	0.30	0.923 0	区外
	0.35	0.916 9	区外
	0.40	0.909 7	区外

5.3　不同限流电抗影响

限流电抗器在系统发生故障时会限制电流的变化率，从而影响故障电流的微分极性和 Canberra 相似度计算的结果。为测试不同限流电抗对本文方法的影响，设置限流电抗为 0.1~0.2 H，仿真结果如图 8 所示。由图可知，本文方法能够在不同限流电抗的情况下准确地进行故障定位和保护。

5.4　雷击干扰

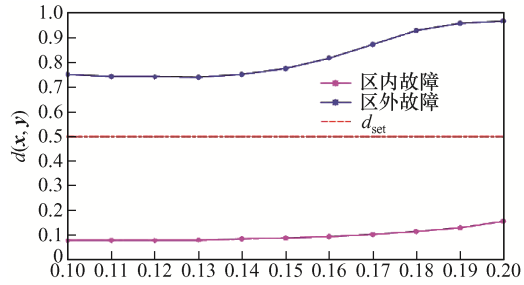
自然界中的雷击多为负极性，本文采用 2.6/50 μs 负极性双指数雷击电流模型，具体为

$$i(t)=-I_{\mathrm{g}}(\mathrm{e}^{-t/\tau_1}-\mathrm{e}^{-t/\tau_2}) \tag{16}$$

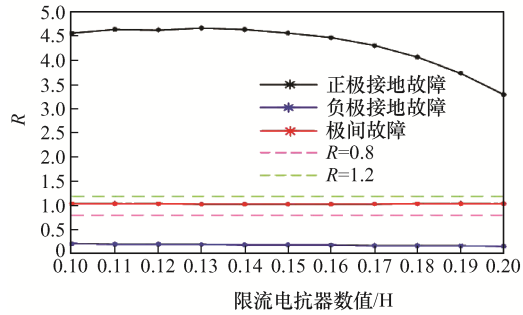
式中：I_{g} 为雷击电流，I_{g}=4 000 A；τ_1、τ_2 分别为波头上升时间与半峰时间，τ_1=2.6 μs，τ_2=50.0 μs。

本保护方案和文献[1]、[9]的保护方案受到雷

击干扰时的故障特征量如图 9 所示。



(a) 故障区域判别结果

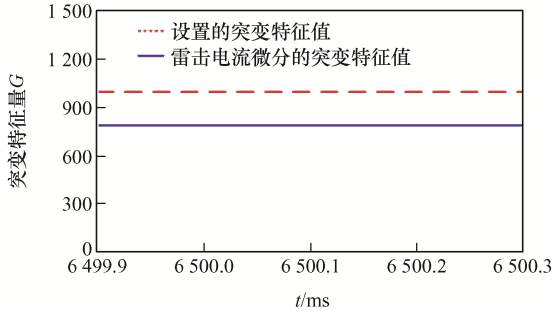


(b) 故障极判别结果

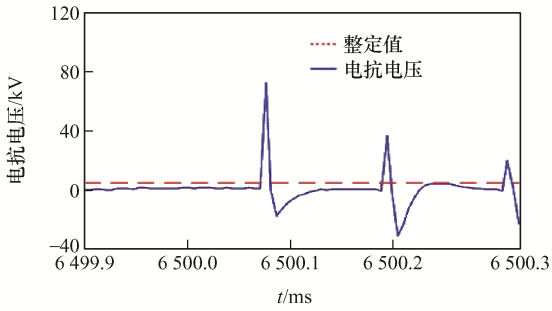
图 8 限流电抗变化时的故障判别结果

Fig. 8 Fault discrimination results under changes in current-limiting reactance

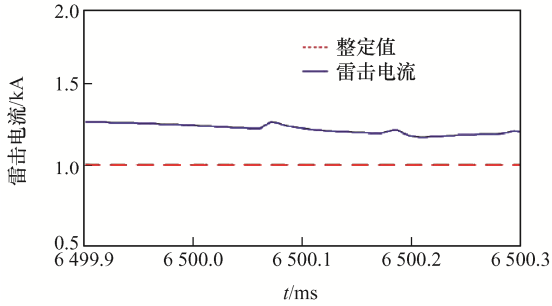
由图 9(a)可知，虽然过电流幅值较大，但突变时间小于 0.2 ms，故障启动模块的时间窗为 0.5 ms，在发生雷击干扰的情况下，本文方法故障电流的微分值在此时间窗内，经过 Toeplitz 矩阵数值化后的突变特征量小于保护设定值，不会在雷击干扰下产生误动；由图 9(b)和(c)可知，文献[1]和[9]方案的整定值会因雷击干扰超过所设定的值，从而产生误动，因此本文方法具备较强的抗雷击干扰特性。



(a) 本文中结果



(b) 文献[1]结果



(c) 文献[9]结果

图 9 雷击干扰下的特征量

Fig. 9 Features under lightning disturbance

6 结语

本文提出了一种基于电流微分的 Canberra 距离的柔性直流电网的保护新方案，利用故障电流微分通过 Toeplitz 矩阵形式将突变特征量作为保护的启动判据，并放大了故障电流的突变，确保故障保护元件启动，同时有效避免因雷击干扰发生误动。该保护利用区内、外故障时线路两端电流微分的极性特征并结合 Canberra 距离，构造保护判据，可准确识别故障区域，具有良好的选择性。本保护方案仅需故障后 2.0 ms 的数据，对数据精度要求较低，具有良好的速动性。

参考文献：

[1] 周家培，赵成勇，李承昱，等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化，2017, 41(19): 89-94.
Zhou Jiapei, Zhao Chengyong, Li Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor [J]. Automation of

Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94.(in Chinese)

[2] 杨乐, 秦文萍, 陈晓乾, 等. 基于限流控制与保护协同的柔性直流配电线路整体保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4634-4644.
Yang Le, Qin Wenping, Chen Xiaoqian, et al. Overall protection scheme for flexible DC distribution lines based on synergy of current limiting control and protection [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4634-4644. (in Chinese)

[3] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(7): 1760-1771. (in Chinese)

[4] 夏向阳, 徐雷, 易海淦, 等. 基于多目标递阶模型预测理论的MMC能量协同控制研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 472-481.
Xia Xiangyang, Xu Lei, Yi Haigan, et al. Research on energy cooperative control of MMC based on multi-objective recursive model prediction theory [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(10): 472-481. (in Chinese)

[5] 袁佳歆, 陈凡, 赵晋斌, 等. 电感式直流限流器研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1595-1605.
Yuan Jiaxin, Chen Fan, Zhao Jinbin, et al. Review on inductive fault current limiters in direct current systems [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1595-1605. (in Chinese)

[6] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3831.
Wang Congbo, Jia Ke, Bi Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3831. (in Chinese)

[7] 孔飞, 张保会, 王艳婷. 基于行波波形相关性分析的直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 108-114.
Kong Fei, Zhang Baohui, Wang Yanting. A novel pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114. (in Chinese)

[8] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 128-136.
Zhang Xinyu, Fan Yanfang, Ma Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 128-136. (in Chinese)

[9] 吕家乐, 杨景刚, 陈庆, 等. 基于电流微分状态量的直流配电网分布式区域保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 139-146.
Lyu Jiale, Yang Jinggang, Chen Qing, et al. Distributed area protection for DC distribution network based on current differential state variable [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 139-146. (in Chinese)

[10] 童晓阳, 权文杰, 李智, 等. 利用行波波形改进编辑距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 294-300.
Tong Xiaoyang, Quan Wenjie, Li Zhi, et al. Backup protection scheme for flexible DC transmission line by traveling wave waveform similarity based on improved editing distance [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 294-300. (in Chinese)

[11] 余越, 王聪博, 沙兆义, 等. 基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5441-5449.
Yu Yue, Wang Congbo, Sha Zhaoyi, et al. AC transmission line protection for wind farms integrated with VSC-HVDC system based on matrix mutation characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5441-5449. (in Chinese)

[12] Liu Zhen, Gao Houlei, Luo Sibei. Non-unit protection for long-distance LCC-HVDC transmission lines based on waveform characteristics of voltage travelling waves [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 150: 109079.

[13] 刘剑, 范春菊, 邰能灵. 用于高压直流输电线路的新型横差保护方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2266-2274.
Liu Jian, Fan Chunju, Tai Nengling. Novel transverse

differential protection method for HVDC transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2266-2274. (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] 刘欣, 袁易, 王利桐, 等. 柔性直流输电系统三端口混合参数建模及其稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4968-4984.
Liu Xin, Yuan Yi, Wang Litong, et al. Three-port hybrid parameter modeling and stability analysis of MMC-HVDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 4968-4984. (in Chinese)

[16] 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)

[17] Mukherjee B N, Maiti S S. On some properties of positive definite toeplitz matrices and their possible applications [J]. Linear Algebra and Its Applications, 1988, 102: 211-240.

[18] 赵猛, 付明, 李亚飞, 等. 具有 2 种可选拓扑的柔性 DC-DC 变换器研究[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 71-79.
Zhao Meng, Fu Ming, Li Yafei, et al. Research on flexible DC-DC converter with two selectable topologies [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 71-79. (in Chinese)

[19] 付华, 张辉. 基于故障电流特征的多端柔性直流电网故障识别[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 174-184.
Fu Hua, Zhang Hui. Fault identification of multi-terminal MMC-HVDC grid based on fault current characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 174-184. (in Chinese)



杨湛晔

作者简介：

杨湛晔(1981—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力物联网及新型电力系统，能源互联网研究。E-mail：kirksharp@foxmail.com。

韦延方(1982—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：直流电网故障研究。E-mail：weiyanfang@hpu.edu.cn。

赵靖雯(1998—)，女，硕士。研究方向：电气工程与自动化。E-mail：841323909@qq.com。

王鹏(1983—)，男，博士，高级工程师。研究方向：智能配电网技术。E-mail：w-fsfe@163.com。

曾志辉(1978—)，男，博士，副教授。研究方向：电力电子和储能技术。E-mail：575873560@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)