

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231456

基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配网故障检测方法

王晓卫¹, 田影¹, 高杰², 王雪¹, 梁振锋¹, 王毅钊³

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199)

摘要: 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流配电网具有不存在换相失败等优点。但换流器存在低惯性、弱阻尼等特性, 导致故障电流上升速度快且峰值高, 对系统危害极大。针对直流配电网发生单极接地故障难以准确选择故障馈线的问题, 提出了一种基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配网故障检测方法。首先, 利用变分模态分解算法对各馈线零模电流进行分解, 选取特征分量。然后, 计算特征分量的二阶导数, 选择拐点密集区并进行归一化处理, 得到各馈线的凹凸波动性。最后, 判定凹凸波动性与其他馈线相异的线路为故障线路。仿真结果表明, 所提方法能够快速识别故障馈线, 且受过渡电阻、采样频率、数据窗和噪声等因素影响小。

关键词: 故障检测; 单极接地故障; 零模电流; 拐点密集区; 凹凸波动性

A DC distribution network fault detection method based on bump fluctuation at a dense inflection point

WANG Xiaowei¹, TIAN Ying¹, GAO Jie², WANG Xue¹, LIANG Zhenfeng¹, WANG Yizhao³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Institute of Electric Power Research of Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710199, China)

Abstract: Flexible DC distribution networks based on a modular multilevel converter (MMC) have the advantage of no commutation failure. However, because of low inertia, weak damping and other characteristics of the converter, the fault current rises quickly and has a high peak, which is extremely harmful to the system. It is difficult to accurately select the fault feeder when a single-pole ground fault occurs in the DC distribution network. Thus a fault detection method for a DC distribution network based on the fluctuation characteristics of concavity and convexity (FCCC) of the inflection point dense area (IPDA) is proposed. First, a variational mode decomposition algorithm is used to decompose the zero-mode current of each feeder and select the feature components. Then, the second derivative of the feature component is calculated, the IPDA is selected, and the normalization process is carried out to obtain the FCCC of each feeder. Finally, the feeders that are different from the other feeders of the FCCC are determined to be faulty feeders. Simulation results show that the proposed method can quickly identify faulty feeders, and is less affected by factors such as transition resistance, sampling frequency, data window and noise.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61403127).

Key words: fault feeder selection; single-pole ground fault; zero mode current; inflection point dense area; fluctuation characteristics of concave and convexity

0 引言

近年来, 新能源发电技术快速发展的同时带动了电力电子技术的进步, 使得新型电力系统直流化

趋势愈发明显。因直流配电系统具有线路损耗小、消纳分布式电源能力强、交直流变换次数少等优势^[1-2], 已逐步成为国内外研究的热点。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流配电网具有无功功率和有功功率可单独控制、不存在换相失败以及换流环节少等优势, 在配网中所占比例逐渐增加。但基于 MMC 的直流配电网存

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177114, 61403127);
国网陕西省电力有限公司科技项目资助(5226KY23001C)

在系统低惯性、弱阻尼、无电流过零点等特性^[6]，导致系统发生单极接地故障后，故障电流上升速度快且峰值高^[7]。由于换流器中电力电子器件耐受暂态冲击电流的能力有限，如果不及时切除故障，会对系统中绝缘栅双极晶体管、二极管等器件带来很大的冲击，从而危害系统中其他配电设备^[8-11]。所以直流配电系统发生故障后，需要保护方案在 3 ms 内快速选择出故障线路并进行隔离，这是直流配电网亟待解决的问题。

近年来，国内外学者针对柔性直流配电网的故障检测问题开展了大量研究。根据是否需要通信将现有的直流系统保护分为单端量保护和双端量保护。双端量保护避免了单端量保护带来的阈值整定问题，灵敏度高，但易受通信装置的影响，降低了保护的速动性。文献[12]对线路两侧暂态电流波形求余弦相似度，然后通过阈值进行故障识别，但在大过渡电阻下暂态电压变化微弱，不能准确识别故障线路。文献[13-14]计算馈线两端差流的短时能量选线，该方法易受通信能力的影响。文献[15-16]利用行波构成保护，但配网中线路分支多且保护抗干扰能力差。文献[17-18]利用直流故障暂态电压、电流在平波电抗器两端高频段内产生的差异构造判据，但在配网中电抗器值过大可能会影响电能传输效率。文献[19]利用电网故障信息结合图论的方法提出了基于电磁时间反转理论的故障选线方法，该方法基于多测点的综合数据进行研判，判别性能受测量设备精度和采样率的影响较大。文献[20]提出在交流侧采用高电阻和避雷器并联的接地方式，在直流配电网中实现差动保护，但其速度较差。单端量保护不需要考虑通信，能快速动作。文献[21]综合利用集合经验模态分解、主成分分析及相关系数对暂态电流进行处理，实现故障选线。文献[22]根据故障馈线与健全馈线从首端看入的线路零模阻抗性质不同，提出换流器注入正弦探测信号的接地故障识别方法，该方法需要修改控制系统且参数设置较为复杂。文献[23]利用短时傅里叶变换对故障电流信号进行处理，利用频谱幅值进行故障检测，但是需要选择合适的窗函数。文献[24]利用标准拟合函数对故障零模电流进行拟合，得到自适应行波保护，但此方法需要提前对过渡电阻的区间进行估计，这将导致计算结果不确定性增大。文献[25]针对直流配电网发生单极故障，利用直流侧集中电容放电脉冲的主动式故障选线方法。文献[26]利用模糊理论融合零模电流相关性与母线零模电压夹角余弦以及能量相对熵 3 种判据构造故障识别方法。

综上所述，基于单端法的配网保护具有速动性好、不受通信影响等优势，但上述方法大多数针对多端系统，而对中低压辐射状配电网研究较少，这更适用于可靠性要求较低的数据中心和住宅直流配电网。据此，本文针对单电源柔性直流配电网发生单极接地故障，提出了一种基于零模电流拐点密集区(inflexion point dense area, IPDA)凹凸波动特性(fluctuation characteristics of concave and convexity, FCCC)的直流配网故障检测方法。首先，对系统发生单极接地故障时各馈线零模电流进行分析；其次，对零模电流进行变分模态分解并选择特征分量；再次，对特征分量求二阶导数，选取拐点密集区；进而，利用零模电流在拐点密集区内的凹凸波动性构建选线判据；最后，通过电磁暂态仿真软件验证了所提保护方法的快速性和可靠性。

1 直流系统故障等效模型

1.1 柔性直流配电网拓扑

MMC 采用小电流接地方式发生单极接地故障时不存在放电回路，能够有效减小故障发生瞬间的短路电流，因此配网多采用小电流接地方式以提高系统稳定性。小电流接地方式包括交流侧接地和直流侧接地两类^[27]，交流侧接地方式主要包括：与 MMC 连接的变压器阀侧采用大电阻接地方式，如图 1(a)所示；与 MMC 连接的变压器阀侧采用 Δ 接线方式，并利用星型电抗器构成中性点后通过电阻接地以提供零电位点，如图 1(b)所示。直流侧接地方式为 MMC 直流侧出口处经箱位电阻中点接地，如图 1(c)所示。

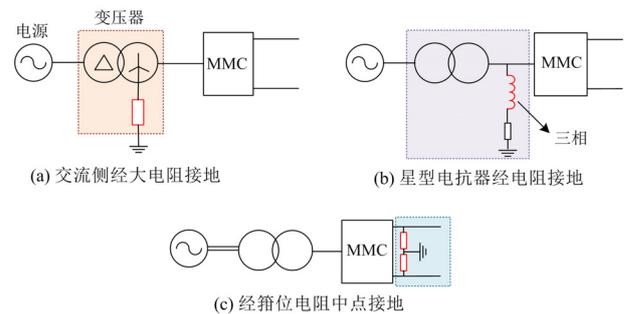


图 1 MMC 小电流接地方式

Fig. 1 MMC's small current grounding mode

本文以基于 MMC 的单电源柔性直流辐射状配电网作为研究对象，系统结构如图 2 所示。交流变压器采用 Y/ Δ 接线方式；MMC 采用直流侧接地方式以及双闭环控制策略。

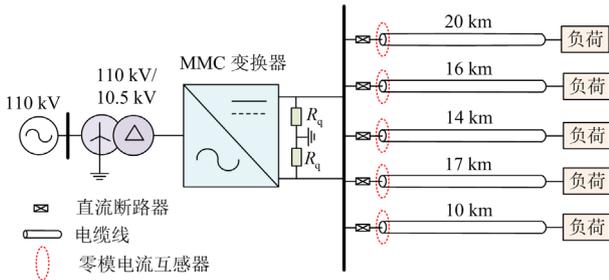


图2 辐射状柔性直流配电系统

Fig. 2 Radial flexible DC distribution system

1.2 单极接地故障下零模电流分析

以第 n 条线路发生正极接地故障为例，由于MMC采用直流侧接地方式，如图3所示，故障电流共包括三条流通路径：①故障点→平波电抗器→箝位电阻→大地；②故障点→平波电抗器→MMC→箝位电阻→大地；③故障点→平波电抗器→MMC→平波电抗器→健全线路以降低接地故障对直流系统的威胁，箝位电阻值很大，系统在故障线路产生的短路电流很小，子模块电容也没有产生明显的放电现象，因此在此接地方式下，系统能继续带电运行一段时间而不发生闭锁。

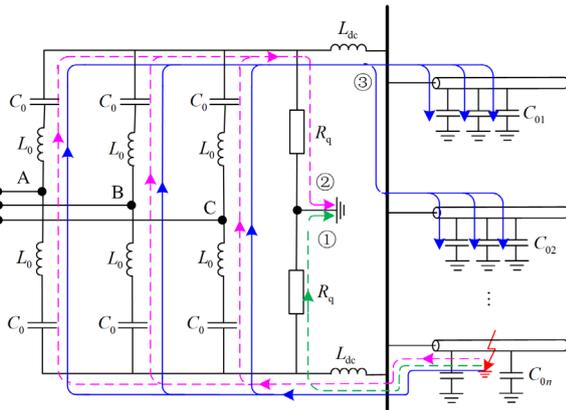


图3 系统的故障电流流通过程

Fig. 3 Fault current flow path of the system

图中： L_0 表示桥臂电感； L_{dc} 表示平波电抗器； R_q 表示箝位电阻； C_0 表示子模块电容； C_{0i} 表示各条线路对应的零模线路电容， i 表示馈线数目($i=1,2,\dots,n$)。

系统中零模电气量仅包含正负极方向性质相同的部分，所以零模电流不能在正负极线路中形成环流，只在两极的流通方向相同，最终流入大地，因此零模网络的流通过程与变压器接地方式和MMC接地方式有关。根据直流系统的故障电流流通过程，得到单极接地故障下的零模等效网络，如图4所示。

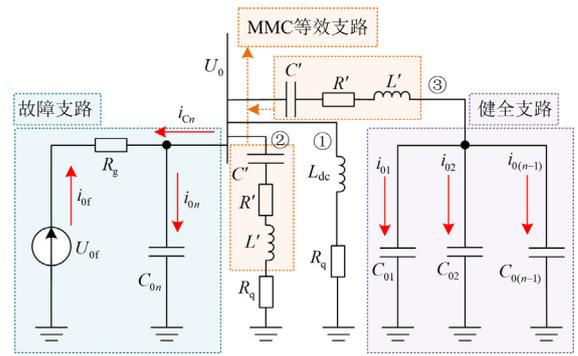


图4 零模等效图

Fig. 4 Zero-mode equivalent network

换流器在正常运行状态时，MMC三条支路中总的子模块电容器储能和总电压不发生变化，因此可将MMC零模等效为由RLC组成的串联回路进行分析。图4中： $R' = R_0/3$ ， R_0 表示桥臂电阻； $L' = L_0/3$ ； $C' = 12C_0/N$ ， N 表示导通的半桥子模块(submodule, SM)个数； U_0 表示母线零模电压； U_{of} 表示故障处零模电压； i_x 表示流过各条线路的零模电流($x=0i, 02, \dots, 0f$)；零模接地电阻 $R_g = 2R_x$ ， R_x 表示线路发生接地故障时的接地电阻，由于箝位电阻值很大，因此路径①和②相当于开路，系统简化的零模等效网络见图5。

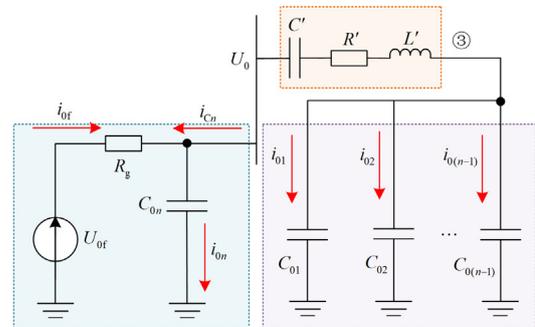


图5 简化的零模等效网络

Fig. 5 Simplified zero-mode equivalent network

线路发生单极接地故障后，正极电压由故障前的 $U_{np}/2$ 变为零， U_{np} 为直流极间电压，而负极电压由故障前的 $-U_{np}/2$ 变为 $-U_{np}$ ，因此必定存在一个由故障极向健全极的充电暂态回路③，此时故障零模电流经过MMC分别流向各条健全馈线。由此可知，故障线路的零模电流为所有健全线路的零模电流之和且方向相反，而健全线路之间方向相同。根据系统的零模电流流通方向，可将单极接地故障下的零模等效简化图改写为如图6所示的等效回路。

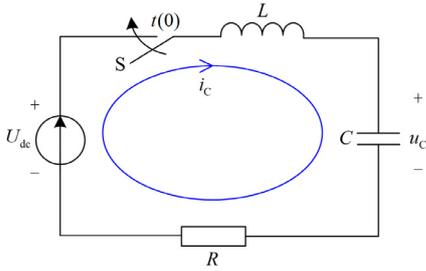


图6 故障线路零模电流等效回路

Fig. 6 Equivalent loop of faulty feeder zero-mode current

在 $t(0)$ 时发生故障, 开关 S 闭合。图中: L 为桥臂电感与平波电抗器之和, $L = L_0/3 + L_{dc}$; C 为桥臂电容与健全线路零模电容之和, $C = 12C_0/N + C_q$, $C_q = \sum_{i=1}^{n-1} C_{0i}$; R 是桥臂电阻与零模接地电阻之和, $R = R_0/3 + R_g$; U_{dc} 表示故障点零模电压, $U_{dc} = U_p + U_n/\sqrt{2}$, U_p 、 U_n 分别表示正、负极电压; u_c 表示电容两端的电压; i_c 表示电容两端的电流。由于故障发生前无零模电流, 所以, $i_c(0+) = i_c(0-) = 0$, $u_c(0+) = u_c(0-) = 0$ 。由图6可以看出, 基于 MMC 的直流网发生单极接地故障时, 系统可以等效为一个 RLC 串联回路, 激励是与阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 有关的量, 列写如式(1)所示的电路方程。

$$\begin{cases} U_{dc} = LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c \\ i_c = C \frac{du_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

计算式(1)的特征根: $\delta_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$ 。

根据 R 值将解分为两种形式。

1) 当接地电阻较大且满足 $R > 2\sqrt{L/C}$ 时, 故障回路处于过阻尼非周期放电回路。

故障线路零模电容电压 $u_c(t)$ 、故障线路的零模电流 $i_{cf}(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_{cf}''(t)$ 的公式分别为

$$u_c(t) = U_{dc} + K_1 e^{\delta_1 t} + K_2 e^{\delta_2 t} \quad (2)$$

$$i_{cf}(t) = C \frac{du_c}{dt} = C(K_1 \delta_1 e^{\delta_1 t} + K_2 \delta_2 e^{\delta_2 t}) \quad (3)$$

$$i_{cf}''(t) = C(K_1 \delta_1^3 e^{\delta_1 t} + K_2 \delta_2^3 e^{\delta_2 t}) \quad (4)$$

健全线路的零模电流 $i_c(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_c''(t)$ 分别为

$$i_c(t) = -\frac{1}{n-1} C(K_1 \delta_1 e^{\delta_1 t} + K_2 \delta_2 e^{\delta_2 t}) \quad (5)$$

$$i_c''(t) = -\frac{1}{n-1} C(K_1 \delta_1^3 e^{\delta_1 t} + K_2 \delta_2^3 e^{\delta_2 t}) \quad (6)$$

式中: $K_1 = -[U_{dc} + U_{dc}/(\delta_2/\delta_1)]$; $K_2 = U_{dc}/(\delta_2/\delta_1)$ 。

由式(3)一式(6)可以看出, 在故障发生的初始瞬间, 由于存在接地电阻、线路电阻, 消耗的能量较大, 所以零模电流不存在振荡而是一个衰减的暂态波动过程, 随后逐渐趋于稳定。健全线路与故障线路的差距是由线路对地电容的电流流向所决定的, 故障线路与健全线路的零模电流二阶导数在数值上呈现 $(n-1)$ 倍的关系, 总体方向趋势相反。

2) 当接地电阻较小且满足 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时, 故障回路处于欠阻尼的放电回路。

故障线路零模电容电压 $u_c(t)$ 、零模电流 $i_{cf}(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_{cf}''(t)$ 的公式分别为

$$u_c(t) = U_{dc} + [K_1 \cos(\omega_d t) + K_2 \sin(\omega_d t)] \quad (7)$$

$$i_{cf}(t) = -\alpha CK [e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t + \varphi)] - Ke^{-\alpha t} \omega_d \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (8)$$

由初始条件得到 $K_1 = -U_{dc}$ 、 $K_2 = 0$, 则

$$u_c(t) = U_{dc} - U_{dc} \cos(\omega_d t) \quad (9)$$

$$i_{cf}(t) = CU_{dc} \omega_d \sin(\omega_d t) \quad (10)$$

$$i_{cf}''(t) = -CU_{dc} \omega_d^3 \sin(\omega_d t) \quad (11)$$

式中: α 为衰减系数, $\alpha = R/(2L)$; ω_0 为谐振角频率, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; ω_d 为衰减谐振角频率, $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$; $S_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_d$ 。

健全线路的零模电流 $i_c(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_c''(t)$ 的公式分别为

$$i_c(t) = -\frac{1}{n-1} CU_{dc} \omega_d \sin(\omega_d t) \quad (12)$$

$$i_c''(t) = -\frac{1}{n-1} CU_{dc} \omega_d^3 \sin(\omega_d t) \quad (13)$$

由文献[28]可知, 单极接地故障将与大地构成回路, 且行波的波头在传播时存在衰减, 非故障极因为线路的耦合作用也会产生波过程, 并且幅值及陡度都小于故障线, 因此, 母线零模电压存在衰减的波动过程, 会对整个系统产生影响。因为实际电路必定存在接地电阻、电力电子元件的通态损耗以及开关损耗等, 因此线路零模电流必会经过一定时间的振荡, 衰减至稳态值。从式(11)与式(13)可以看出, 健全线路与故障线路的零模电流的二阶导数反向。

但在实际中, 式(4)与式(6)存在的反向关系在整个时域中并不是严格满足的; 同样, 式(11)与式(13)所存在的反向关系也存在类似的问题。由于以上分

析均是简化了线路参数、拓扑结构、控制方式、接线方式并忽略了信号噪声等因素而得到的, 所以这种分析结果是理想且有限的。现有研究表明^[29], 在故障特征最剧烈、暂态特征信息最为丰富的时段, 故障线路与健全线路的极性严格满足方向相反这一特性, 因此, 从准确判定故障馈线的角度出发, 亟待从微观角度上研究、标定出完全满足反向特征的时段, 进而为准确选线奠定基础。

1.3 分析验证

以图 2 为例对直流配电系统的故障特征进行分析, 系统包括 5 条馈线, 设定每条线路长 10 km, 第 1 条馈线发生正极接地故障。系统的零模等效网络如图 4 所示, 其中: $N=11$; $L_0=15$ mH, $L'=L_0/3=15/3=5$ mH; $L_{dc}=15$ mH; $C_0=0.3$ mF, $C'=12C_0/N=0.3273$ mF; 单位电缆线路电容为 6.18×10^{-7} F/km, 4 条健全线路的总对地电容为 $0.000618 \times 10 \times 4 = 0.02472$ mF。因为 MMC 等效零模电阻 R' 远小于接地电阻, 因此将其忽略。根据以上数据计算零模等效参数, 得到 $L=20$ mH、 $C=0.3273+0.02472 \approx 0.352$ mF。

根据上述参数计算接地电阻的分界点: $R=2\sqrt{L/C}=2\sqrt{20/0.352} \approx 15.08 \Omega$ 。

1) 大接地电阻 ($R > 15.08 \Omega$)

母线零模电压 U_{dc} 、故障线路的零模电流 $i_{Cr}(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_{Cr}''(t)$ 的表达式分别为

$$U_{dc} = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_p + u_n)\varepsilon(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(-20)\varepsilon(t) = -14.14\varepsilon(t) \quad (14)$$

$$i_{Cr}(t) = 3.52 \times 10^{-4}(K_1 S_1 e^{S_1 t} + K_2 S_2 e^{S_2 t}) \quad (15)$$

$$i_{Cr}''(t) = 3.52 \times 10^{-4}(K_1 S_1^3 e^{S_1 t} + K_2 S_2^3 e^{S_2 t}) \quad (16)$$

健全线路的零模电流 $i_C(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_C''(t)$ 的表达式分别为

$$i_C(t) = -8.8 \times 10^{-5}(K_1 S_1 e^{S_1 t} + K_2 S_2 e^{S_2 t}) \quad (17)$$

$$i_C''(t) = -8.8 \times 10^{-5}(K_1 S_1^3 e^{S_1 t} + K_2 S_2^3 e^{S_2 t}) \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} \delta_1 = -25 + \sqrt{625R^2 - 142045.46} \\ \delta_2 = -25 - \sqrt{625R^2 - 142045.46} \\ K_1 = - \left[14140 + \frac{14140}{\frac{-25 - \sqrt{625R^2 - 142045.46}}{-25 + \sqrt{625R^2 - 142045.46}}} \right] \\ K_2 = \frac{14140}{\frac{-25 - \sqrt{625R^2 - 142045.46}}{-25 + \sqrt{625R^2 - 142045.46}}} \end{cases}$$

根据式(15)一式(18)得出大接地电阻时的故障线路与健全线路的零模电流及其二阶导数随接地电阻与时间变化的三维图, 见图 7。

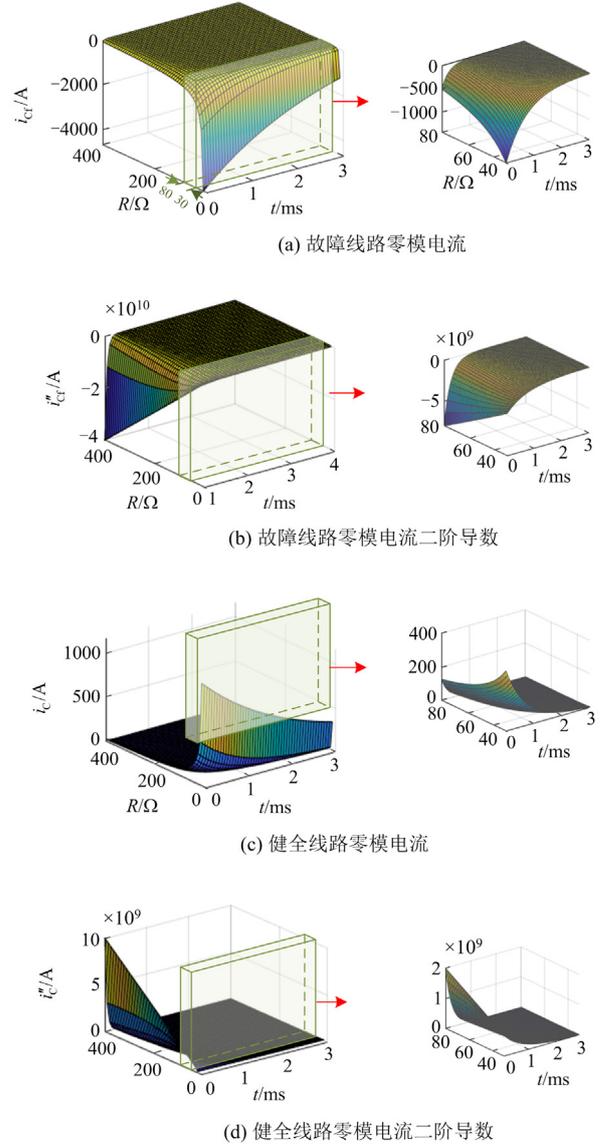


图 7 大接地电阻

Fig. 7 Large ground resistance

2) 小接地电阻 ($R < 15.08 \Omega$)

故障线路的零模电流 $i_{Cr}(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_{Cr}''(t)$ 的表达式分别为

$$i_{Cr}(t) = 5.034 \times \omega_d \sin(\omega_d t) \quad (19)$$

$$i_{Cr}''(t) = -5.034\varepsilon(t)(142045.46 - 625R^2)^{3/2} \cdot \sin\left(\sqrt{142045.46 - 625R^2}t\right) \quad (20)$$

健全线路的零模电流 $i_C(t)$ 及其零模电流二阶导数 $i_C''(t)$ 的表达式分别为

$$i_c(t) = -1.2585\omega_d \sin(\omega_d t) \quad (21)$$

$$i_c''(t) = 1.2585(142045.46 - 625R^2)^{3/2} \cdot \sin(\sqrt{142045.46 - 625R^2}t) \quad (22)$$

式中, $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \sqrt{142045.46 - 625R^2}$, 其中 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC} = 376.89$, $\alpha = R/(2L) = 25R$ 。

根据式(19)一式(22)得出小接地电阻时的故障线路与健全线路的零模电流及其二阶导数随接地电阻与时间变化的三维图, 见图 8。

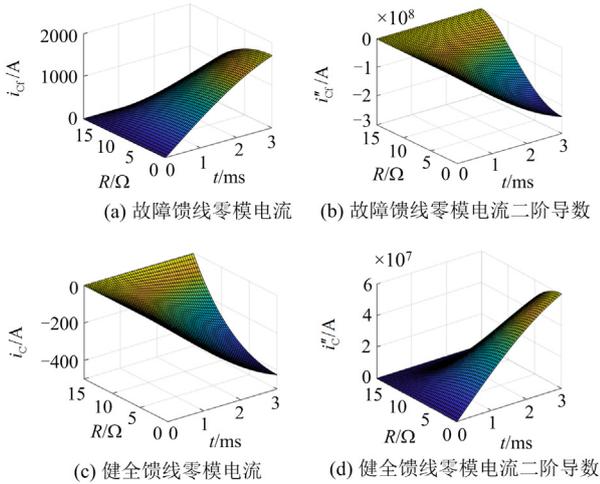


图 8 小接地电阻

Fig. 8 Small ground resistance

由图 8 可知, 故障发生后, 故障线路与健全线路的零模电流都随时间逐渐增大, 但过渡电流增大时, 其增长速率减小。因此, 故障线路与健全线路的零模电流在方向上呈现相反趋势, 且故障线路的零模电流为其他 4 条健全线路之和, 零模电流二阶导数具有类似规律, 与上述分析对应。

2 选线基本原理

2.1 变分模态分解(VMD)

由于分布式能源不断接入电网, 噪声及谐波将使波形的特征变得不明显, 从而影响选线的准确性。本文利用 VMD 对线路的零模电流进行预处理, 得到滤除高频之后的特征分量, 以削弱噪声和谐波对零模电流的影响, 该特征分量与原始波形趋势相同, 且具有高的相似性。

文献[30]将含有噪声和高次谐波的原始波形经 VMD 处理之后, 得到的滤波分量更平滑。具体关于 VMD 的原理详见文献[31]。

2.2 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数 r 用于度量两个变量 X 与 Y 间的相关性, 计算值介于 -1 与 1 之间, 计算式见式(23)。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (23)$$

式中: X_i 、 Y_i 均表示样本曲线上的数据点; \bar{X} 、 \bar{Y} 分别表示 X 与 Y 的平均值。

计算皮尔逊相关系数 r , 并根据 r 在式(24)中的取值区间来判断样本 X 与 Y 之间的相关强度。

$$r = \begin{cases} 0.8 \sim 1.0 & \text{极强相关} \\ 0.6 \sim 0.8 & \text{强相关} \\ 0.4 \sim 0.6 & \text{中强相关} \\ 0.2 \sim 0.4 & \text{弱相关} \\ 0.0 \sim 0.2 & \text{无相关} \end{cases} \quad (24)$$

2.3 曲线凹凸性

数学中的二阶导数定义如下: 如图 9 所示, 对于连续函数 $f(x)$, 在区间 (t_0, t_1) 内, $f''(x) < 0$, $f(x)$ 为凸弧, 显示为弧 ABC 始终高于首末端点连成的线段 AC ; t_2 满足 $f''(t_2) = 0$, 点 $(t_1, f(t_1))$ 是拐点; 在区间 (t_1, t_2) 内, $f''(x) > 0$, $f(x)$ 为凹弧, 显示为弧 CDE 始终低于首末端点连成的线段 CE , 并根据凹凸性描述曲线上点的切线斜率的变化趋势^[32]。

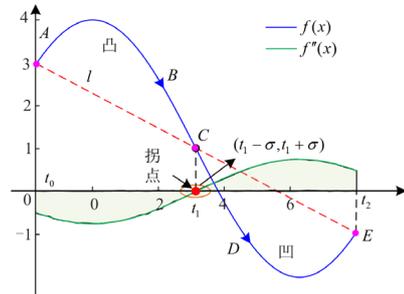


图 9 曲线凹凸性及拐点示意图

Fig. 9 Convexity and inflection point of the curve

分析图 9 可知, 在拐点 $(t_1, f(t_1))$ 两侧的 $(t_1 - \sigma, t_1 + \sigma)$ 区间内, 二阶导数绝对值由大变直到零, 再由零逐渐变大, 符号由负变正, 体现了曲线 $f(x)$ 变化最微妙的区段, 具有典型特性, 值得特别关注。

3 基于 FCCC 的选线判据构造

结合第 1 节对基于 MMC 的单端柔性直流配电网发生单极接地故障的零模电流二阶导数分析可知, 故障线路与健全线路的零模电流二阶导数在微观测度下呈现方向完全相反的趋势。本文对线路首端零模电流二阶导数在特征频段内的数据进行分析, 实现了直流配网的选线, 选线流程如图 10 所示, 具体步骤如下。

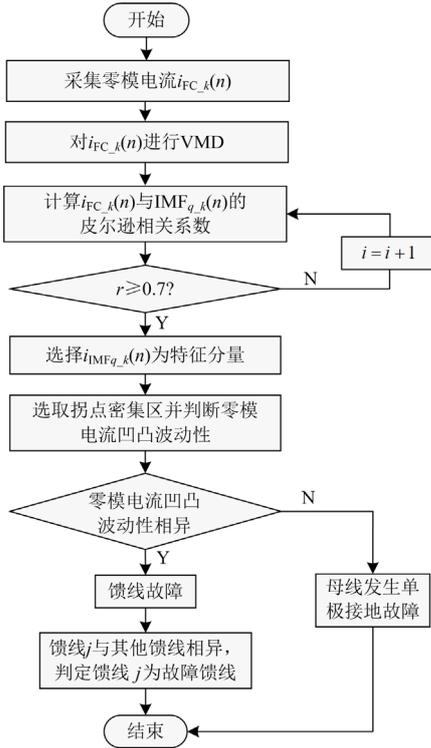


图 10 选线流程

Fig. 10 Fault feeder detection flow chart

1) 利用信号检测装置采集各馈线零模电流 $i_{FC_k}(n)$, $k=1,2,\dots,l$, 其中 l 表示馈线数目, n 表示采样点, $n=1,2,\dots,N$; 再用 VMD 对各馈线零模电流进行变分模态分解, 获得本征模态分量 $IMF_{s_k}(n)$, $s=1,2,\dots,q,\dots,M$, M 表示本征模态分量数目。

2) 利用式(11)计算零模电流 $i_{FC_k}(n)$ 与本征模态分量 $IMF_{q_k}(n)$ 的皮尔逊相关系数 r , 由式(12)可知, 当 r 在区间 $[0.7,1]$ 内时, 说明本征模态分量 $IMF_{q_k}(n)$ 与零模电流 $i_{FC_k}(n)$ 的整体变化趋势相同, 故将 $IMF_{q_k}(n)$ 记为特征分量 $i_{MF_{q_k}}(n)$ 。

3) 利用式(13)计算特征分量 $i_{MF_{q_k}}(n)$ 的二阶导数 $f(n)$ 。

$$f(n) = i_{MF_{q_k}}''(n) = \frac{i_{MF_{q_k}}(n+2) - 2i_{MF_{q_k}}(n+1) + i_{MF_{q_k}}(n)}{h^2} \quad (25)$$

式中, h 表示 $n+1$ 与 n 之间的差值。

定义拐点密集区 (inflection point dense area, IPDA): 当检测到有连续的 4 个及以上的二阶导数 $f(n)$ 满足阈值区间 $[-\delta, \delta]$ 时, δ 为极小值, 则选取连续二阶导数区域附近的 g 个采样点为拐点密集区,

且满足 $f(w)f(g-w+1) < 0$, $w=1,2,\dots,[g/2]$, 其中 $[\cdot]$ 表示取整函数, 否则将检测到的拐点舍弃。

4) 对每条馈线拐点密集区内的二阶导数进行归一化处理, 以消除二阶导数的小数量级和正负符号带来的差异, 归一化计算式为

$$y(g) = \frac{(f_{\max} - f_{\min})(g - g_{\min})}{g_{\max} - g_{\min}} + f_{\min} \quad (26)$$

式中: $y(g)$ 表示第 g 个采样点对应的归一化数值; f_{\max} 、 f_{\min} 分别表示拐点密集区内二阶导数的最大值、最小值; g_{\max} 、 g_{\min} 分别表示拐点密集区内采样点 g 中的最大值、最小值。

定义零模电流凹凸波动性: 如图 11 所示, 零模电流对应的特征分量在拐点密集区内满足凹(凸)变凸(凹)再变凹(凸)的动态变化过程。根据每条馈线的二阶导数在拐点密集区内的归一化数值可以判断每条馈线零模电流的凹凸波动性。

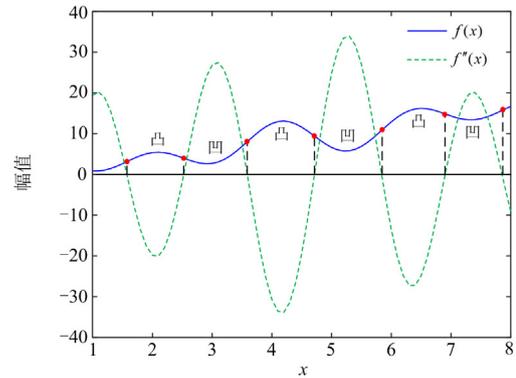


图 11 零模电流波动性示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the FCCC of zero-mode current

5) 选线判据: 若所有线路对应的零模电流在拐点密集区内的凹凸波动性相同, 则判定母线发生单极接地故障; 若第 j 条线路对应的零模电流在拐点密集区内的凹凸波动性与其他馈线相异, 则判定第 j 条线路为故障馈线。

4 仿真验证

本文利用电磁暂态仿真软件 (power systems computer aided design, PSCAD) 建立如图 2 所示的 ± 10 kV 柔性直流辐射状配电系统仿真模型, 具体参数见表 1, 设置采样频率为 40 kHz, 窗长为 3 ms, 以验证本文方法的适应性。

4.1 保护行为分析

1) 在线路 L_1 的 10 km 后设置正极接地故障, 接地电阻为 500 Ω , 以 2 s 时发生故障为例进行分析。在各条馈线首端测得的零模电流见图 12。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

系统仿真参数	数值
额定直流电压/kV	±10
直流电抗器/mH	5
控制策略	定直流电压、定无功功率
MMC 子模块电容/mF	4.5
箝位电阻/MΩ	1
L ₁ 长度/km	20
L ₂ 长度/km	16
L ₃ 长度/km	14
L ₄ 长度/km	17
L ₅ 长度/km	10

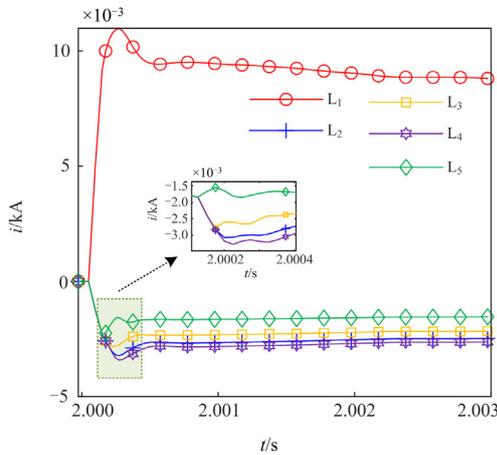


图 12 各馈线零模电流

Fig. 12 Zero-mode current for each feeder

由图 12 可知,故障线路的零模电流迅速从零增大,由于故障后母线电压发生波动,非故障线路的零模电流也发生变化。总体来看,故障线路的零模电流变化量大于健全线路且方向相反。

2) 将各馈线的零模电流经过 VMD, 滤除原始波形中的高次谐波和噪声。用皮尔逊相关系数 r 来度量零模电流与 IMF_1 之间的相关性,以此验证 IMF_1 与零模电流具有相同的变化趋势。各馈线对应的 r 见表 2。

表 2 各馈线对应的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient for each feeder

馈线	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
r	0.837	0.851	0.821	0.863	0.737

由表 2 可得,各馈线的零模电流与 IMF_1 有较强相关性,故可用 IMF_1 代替零模电流进行处理。

3) 以 IMF_1 作为零模电流的特征分量,求其二阶导数,并选择各馈线的拐点密集区。经过多组实验

可得,本文所选择的拐点密集区范围内的二阶导数值 δ 属于大于 10^{-4} 的范围,因此将阈值的初始值记为 10^{-5} ,然后逐渐增大。参考文献[31]并结合大量仿真确定 g 为 7 是本系统的最佳值。L₁—L₄ 的拐点密集区选取过程见图 13。

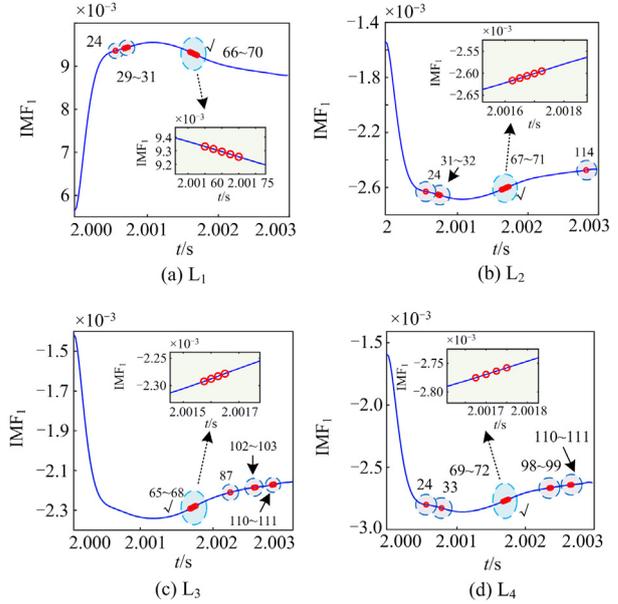


图 13 各馈线拐点密集区选取过程

Fig. 13 The IPDA selection for each feeder

对线路 L₁ 进行分析,如图 13(a)所示,二阶导数在 66~70 存在连续满足阈值范围的数,且数量大于 4,所以将 65~71 选取为拐点密集区,该拐点密集区体现出了这段线路中暂态信息最丰富的时段。图中点 24、29~31 也分别出现了拐点特性,但这些数据不满足拐点密集区的定义,且单个值具有非常强的随机性,易受波形、外界因素的干扰,因此舍弃,增加了数据选取的可靠性。其他线路的拐点密集区选取方法类似,由于篇幅限制,此处不再过多赘述。线路 L₁—L₅ 选取的拐点密集区范围见表 3。

表 3 各馈线拐点密集区选取范围

Table 3 The IPDA range selection for each feeder

馈线	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
采样点范围	65~71	66~72	64~70	68~74	63~69

由表 3 可以看出,当线路发生单极接地故障时,由于配电网线路长度较短,故障行波传播时间短,故障对每一条馈线的干扰近似相同,所以整个系统中各条线路的拐点聚集区的选择范围近似。

4) 各馈线拐点密集区内二阶导数见表 4。对表 4 中每条线路二阶导数值进行归一化处理,结果见表 5,可见消除了原数据的小数量级。

表 4 拐点密集区的二阶导数值

Table 4 The second-order derivative value of the IPDA

采样编号	$L_1(\times 10^{-3})$	$L_2(\times 10^{-3})$	$L_3(\times 10^{-2})$	$L_4(\times 10^{-3})$	$L_5(\times 10^{-2})$
1	-328.99	90.992	9.2557	83.737	6.6903
2	-223.59	63.324	5.5292	55.843	3.9358
3	-114.70	33.760	1.7860	24.805	1.2215
4	-4.4849	2.8663	-1.8681	-8.7624	-1.3788
5	104.78	-28.701	-5.3306	-44.083	-3.7954
6	210.75	-60.228	-8.5063	-80.244	-5.9660
7	311.12	-90.962	-11.311	-116.23	-7.8377

表 5 归一化处理

Table 5 Normalized processing

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6707	0.6959	0.6376	0.7210	0.6208
3	-0.3305	0.3709	0.2736	0.4106	0.2471
4	0.0139	0.0313	-0.0817	0.0749	-0.1108
5	0.3553	-0.3156	-0.4184	-0.2784	-0.4435
6	0.6864	-0.6622	-0.7272	-0.6401	-0.7423
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障线路	L_1				

线路 L_1 的零模电流凹凸波动性示意图见图 14: 在拐点密集区内, 二阶导数的符号呈现由负变正; 二阶导数的绝对值呈现由大变小再变大的趋势。此过程可以看出, 在拐点密集区范围内, ①到⑦对应的凹凸趋势为极凸→凸→微凸→0→微凹→凹→极凹, 体现了由凸到凹的凹凸波动性。根据表 5 可知, 线路 L_2-L_5 体现了由凹到凸的凹凸波动性, 分析方法与 L_1 类似, 由于篇幅限制, 此部分不再赘述。

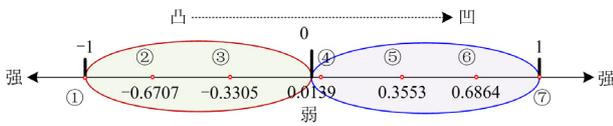


图 14 L_1 的零模电流凹凸波动性示意图

Fig. 14 The FCCC schematic for zero-mode current of L_1

5) 利用步骤 4) 中各馈线的凹凸波动性进行选线。线路 L_1 在拐点密集区内呈现由凸变凹的趋势, 线路 L_2-L_5 呈现由凹变凸的趋势。由于馈线 L_1 的凹凸波动性与其他馈线相异, 故判定馈线 L_1 为故障馈线。分析可知, 本文所提保护方案能够准确识别故障线路。

4.2 保护算法性能

为验证本文方法的有效性, 本节通过改变直流

配网的接地电阻 R_g 、故障距离 H 、不同 MMC 接地方式以及采样频率、数据窗和噪声强度来验证所提方法的适应性。

1) 不同接地电阻

当直流配电系统的线路发生单极接地故障时, 不同接地电阻会对零模暂态电流产生一定影响, 为验证本文算法的有效性, 在线路 L_1 首端 5 km 处设置正极接地故障, 接地电阻为 10、5000、10 000 Ω , 零模电流如图 15 所示, 可以看出, 当接地电阻增大时, 零模电流的暂态特征越来越微弱。计算结果见表 6—表 8, 表明本文方法能够准确识别故障馈线。

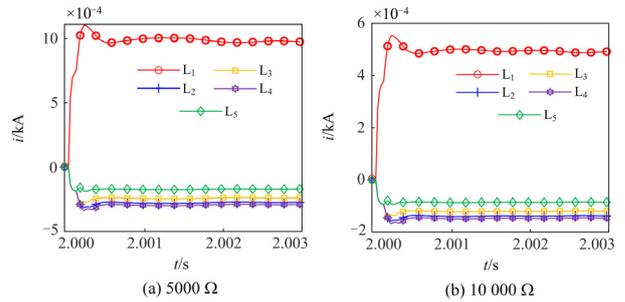


图 15 R_g 分别为 5000 Ω 与 10 000 Ω 时的各线路零模电流

Fig. 15 Zero-mode current for each feeder when

$R_g = 5000 \Omega$ and 10 000 Ω

表 6 $R_g = 10 \Omega$ 时各线路凹凸波动性

Table 6 The FCCC for each feeder when $R_g = 10 \Omega$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6718	0.6721	0.6932	0.6541	0.6737
3	-0.3374	0.3386	0.3701	0.3109	0.3394
4	0.0004	0.0017	0.0345	-0.0279	0.0007
5	0.3383	-0.3358	-0.3093	-0.3605	-0.3383
6	0.6728	-0.6708	-0.6560	-0.6852	-0.6733
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L_1				

表 7 $R_g = 5000 \Omega$ 时各线路凹凸波动性

Table 7 The FCCC for each feeder when $R_g = 5000 \Omega$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6886	0.7102	0.6430	0.6952	0.6245
3	-0.3585	0.3919	0.2852	0.3655	0.2571
4	-0.0169	-0.0529	-0.0649	0.0205	-0.0947
5	0.3286	-0.2983	-0.4000	-0.3294	-0.4246
6	0.6701	-0.6524	-0.7135	-0.6732	-0.7275
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L_1				

表 8 $R_g = 10\ 000\ \Omega$ 时各线路凹凸波动性

Table 8 The FCCC for each feeder when $R_g = 10\ 000\ \Omega$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.5849	0.5376	0.7054	0.5383	0.6847
3	-0.2030	0.1271	0.3896	0.1213	0.3521
4	0.1455	-0.2304	0.0554	-0.2440	0.0088
5	0.4614	-0.5356	-0.2925	-0.5535	-0.3372
6	0.7458	-0.7910	-0.6472	-0.8053	-0.6767
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L_1				

2) 不同故障距离

设置故障距首端 L_1 出口处 5 km、12 km 发生正极接地故障、在 L_1 出口 16 km 处发生负极接地故障，接地电阻为 $100\ \Omega$ ，计算结果见表 9—表 11，可以看出，当故障发生在不同位置时，本文所提方法能够准确识别故障馈线。

3) 不同 MMC 接地方式

为了验证本文方法在其他小电流接地方式下依旧能够识别故障馈线，本节验证了变压器阀侧采用 $1000\ \Omega$ 电阻接地、直流侧不接地的小电流方式，其他参数与表 1 一致。设置故障发生在线路首端 L_4

表 9 $H = 5\ \text{km}$ 处时各线路凹凸波动性

Table 9 The FCCC for each feeder at $H = 5\ \text{km}$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6368	0.6235	0.6028	0.6430	0.7035
3	-0.2810	0.2584	0.2248	0.2905	0.3915
4	0.0635	-0.0900	-0.1282	-0.0533	0.0640
5	0.3932	-0.4177	-0.4516	-0.3847	-0.2781
6	0.7059	-0.7216	-0.7426	-0.7010	-0.6335
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L_1				

表 10 $H = 12\ \text{km}$ 处时各线路的凹凸波动性

Table 10 The FCCC for each feeder at $H = 12\ \text{km}$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6330	0.6652	0.6331	0.6856	0.6143
3	-0.2701	0.3217	0.2680	0.3547	0.2374
4	0.0814	-0.0236	-0.0861	0.0134	-0.1209
5	0.4144	-0.3537	-0.4205	-0.3312	-0.4515
6	0.7225	-0.6915	-0.7273	-0.6716	-0.7467
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L_1				

表 11 $H = 16\ \text{km}$ 处时各线路凹凸波动性

Table 11 The FCCC for each feeder at $H = 16\ \text{km}$

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	1	-1	-1	-1	-1
2	0.6432	-0.6595	-0.5886	-0.6788	-0.4222
3	0.2893	-0.3121	-0.2080	-0.3411	0.0526
4	-0.0563	0.0348	0.1398	0.0044	0.4238
5	-0.3888	0.3737	0.4553	0.3489	0.6970
6	-0.7044	0.6976	0.7406	0.6836	0.8835
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凹→凸	凸→凹	凸→凹	凸→凹	凸→凹
故障馈线	L_1				

出口 5 km 处，故障起始时刻为 2 s，故障持续时间为 0.1 s，接地电阻分别为 $500\ \Omega$ 、 $1000\ \Omega$ ，各馈线零模电流波形如图 16 所示。

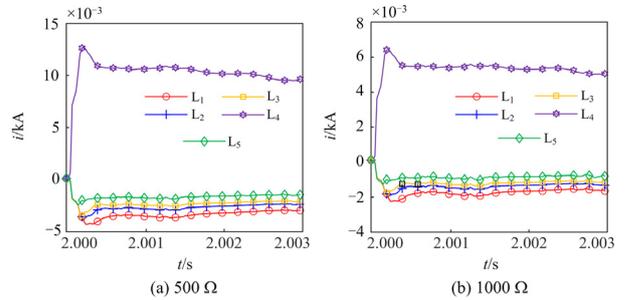


图 16 不同 MMC 接地方式下 $500\ \Omega$ 、 $1000\ \Omega$ 各线路零模电流
Fig. 16 Zero-mode current for each feeder of $500\ \Omega$ and $1000\ \Omega$ with different MMC grounding mode

由图 16 可见，故障馈线零模电流大于健全馈线，方向对应相反，当接地电阻增大时，零模电流减小，暂态特征变弱。由表 12、表 13 可以看出，本文方法能够正确选出故障线路。

4) 不同采样频率

在实际情况在中，不同系统所使用的采样频率可能是不同的，为了验证本文方法具有适应不同采

表 12 不同 MMC 接地方式下发生 $500\ \Omega$ 故障时各线路凹凸波动性

Table 12 The FCCC for each feeder of $500\ \Omega$ fault with different MMC grounding mode

采样编号	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	-1	-1	-1	1	-1
2	-0.6330	-0.7304	-0.8154	0.7656	-0.7667
3	-0.2718	-0.4315	-0.5653	0.4751	-0.4830
4	0.0772	-0.1044	-0.2514	0.1397	-0.1550
5	0.4085	0.2472	0.1208	-0.2277	0.2088
6	0.7174	0.6179	0.5420	-0.6127	0.5979
7	1	1	1	-1	1
波动性	凸→凹	凸→凹	凸→凹	凹→凸	凸→凹
故障馈线	L_4				

表 13 不同 MMC 接地方式下发生 1000 Ω 故障时各线路凹凸波动性

Table 13 The FCCC for each feeder of 1000 Ω fault under different MMC grounding mode

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	1	1	1	-1	1
2	0.6000	0.6111	0.6325	-0.6587	0.6070
3	0.2174	0.2314	0.2642	-0.3057	0.2235
4	-0.1402	-0.1289	-0.0936	0.0477	-0.1390
5	-0.4661	-0.4599	-0.4301	0.3901	-0.4699
6	-0.7543	-0.7528	-0.7352	0.7109	-0.7596
7	-1	-1	-1	1	-1
波动性	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凸→凹	凹→凸
故障馈线	L ₄				

样频率的能力, 设置故障发生在 L₁ 后 10 km 处、故障类型为正极接地故障, 接地电阻为 500 Ω, 故障发生时刻为 2 s, 数据窗为 3 ms, 采样频率分别为 20 kHz、50 kHz, 选线结果见表 14、表 15。

不同的采样频率在同样的数据窗中得出的采样点不一样, 对暂态特征造成的影响不同。由表 14、表 15 可以看出, 采样频率分别为 20 kHz、50 kHz 时本文方法能正确选择故障馈线。

表 14 采样频率为 20 kHz 时各线路凹凸波动性

Table 14 The FCCC for each feeder at 20 kHz sampling frequency

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	-1	1	1	1	1
2	-0.6561	0.7029	0.5806	0.7407	0.3705
3	-0.2841	0.3549	0.1651	0.4158	-0.1516
4	0.0958	-0.0233	-0.2230	0.0433	-0.5459
5	0.4564	-0.4002	-0.5598	-0.3447	-0.8082
6	0.7673	-0.7384	-0.8239	-0.7072	-0.9508
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L ₁				

表 15 采样频率为 50 kHz 时各线路凹凸波动性

Table 15 The FCCC for each feeder at 50 kHz sampling frequency

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	1	-1	-1	-1	-1
2	0.4683	-0.5024	-0.4905	-0.5292	-0.3752
3	0.0131	-0.0646	-0.0323	-0.1072	0.1696
4	-0.3600	0.3062	0.3546	0.2592	0.5935
5	-0.6503	0.6065	0.6582	0.5662	0.8730
6	-0.8614	0.8368	0.8732	0.8128	1
7	-1	1	1	1	0.9786
波动性	凹→凸	凸→凹	凸→凹	凸→凹	凸→凹
故障馈线	L ₁				

5) 不同数据窗

系统发生单极接地故障时, 由于负荷电流的影

响, 在故障初始存在一个从正常运行状态转变为故障状态的过渡过程。尤其当系统采样频率高、数据窗短时, 可能无法满足直流线路保护的速动性。设置故障发生在线路 1 后 10 km 处、故障类型为正极接地故障, 接地电阻为 50 Ω, 故障发生时刻为 2 s, 采样频率为 40 kHz, 数据窗分别取 1.5 ms 和 2 ms, 选线结果见表 16、表 17。

表 16 数据窗为 1.5 ms 时各线路凹凸波动性

Table 16 The FCCC for each feeder of 1.5 ms data window

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	1	-1	-1	-1	-1
2	0.5053	-0.3995	-0.8704	-0.1283	-0.8767
3	-0.0731	0.2356	-0.7516	0.5377	-0.8143
4	-0.5859	0.3437	-0.4199	0.8935	-0.4953
5	-0.8128	0.7501	-0.1274	0.9014	-0.3435
6	-0.9181	0.8795	0.2478	0.9686	0.3142
7	-1	1	1	1	1
波动性	凹→凸	凸→凹	凸→凹	凸→凹	凸→凹
故障馈线	L ₁				

表 17 数据窗为 2 ms 时各线路凹凸波动性

Table 17 The FCCC for each feeder of 2 ms data window

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	-1	1	1	1	1
2	-0.8184	0.3687	0.5357	0.5712	0.6503
3	-0.6467	0.0446	0.1976	0.2815	0.2767
4	-0.4342	-0.4376	-0.0581	-0.3764	-0.0990
5	-0.1250	-0.7113	-0.2922	-0.6945	-0.4526
6	0.3366	-0.9682	-0.5788	-0.9253	-0.7600
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L ₁				

由表 16、表 17 可知, 本文方法在 1.5 ms、2 ms 的窗长下能够正确识别故障馈线。由于采样点的数量和采样频率有直接关系, 且本文方法所需数据量不宜过少, 因此在实际应用中, 数据窗长的选择可以根据系统的处理器运算速度、采样频率等因素进行调整。

6) 不同噪声强度

噪声对零模电流影响较大, 一般用信噪比 (signal noise ratio, SNR) 表示噪声与原始信号的比例关系, 具体测试为: 在线路 L₁ 后 10 km 处发生正极接地故障, 接地电阻为 100 Ω, 故障发生时刻为 2 s, 采样频率为 40 kHz, 数据窗为 3 ms, 信号受到 20 dB、30 dB 高斯白噪声, 选线结果如图 17 所示, 在零模电流中加入 20 dB 噪声后明显变得不光滑, 但是利用所提选线方案进行分析, 具体仿真结果如表

18、表 19 所示，表明所提方法能够提升故障线路和健全线路信号差异性，在一定程度上抑制噪声。

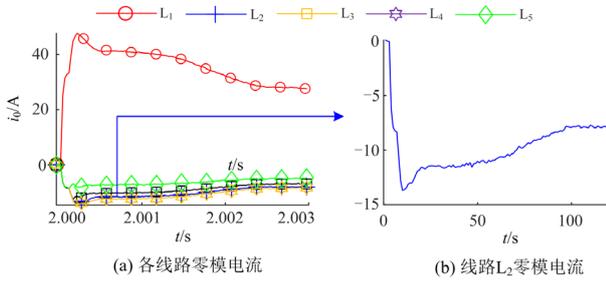


图 17 20 dB 噪声下各线路零模电流

Fig. 17 Zero-mode current of each feeder under 20 dB noise

表 18 20 dB 噪声下各线路凹凸波动性

Table 18 The FCCC for each feeder in 20 dB noise

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	1	-1	-1	-1	-1
2	0.9726	-0.8889	-0.8363	-0.9125	-0.8913
3	0.7394	-0.6442	-0.5569	-0.8719	-0.6687
4	0.7045	-0.2985	-0.1986	-0.3434	-0.2828
5	0.2493	0.1135	0.2022	0.1206	0.0268
6	-0.3373	0.5574	0.6116	0.5030	0.8638
7	-1	1	1	1	1
波动性	凹→凸	凸→凹	凸→凹	凸→凹	凸→凹
故障馈线	L ₁				

表 19 30 dB 噪声下各线路凹凸波动性

Table 19 The FCCC for each feeder in 30 dB noise

采样编号	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅
1	-1	1	1	1	1
2	-0.7801	0.9599	0.7499	0.9169	0.4116
3	-0.4765	0.7567	0.4293	0.6840	-0.1371
4	-0.1184	0.6854	0.0672	0.3368	-0.5845
5	0.2651	0.2302	-0.3083	-0.0859	-0.8821
6	0.6461	-0.3498	-0.6715	-0.5442	-0.9305
7	1	-1	-1	-1	-1
波动性	凸→凹	凹→凸	凹→凸	凹→凸	凹→凸
故障馈线	L ₁				

5 方法比较

将本文方法与文献[33-34]进行对比。基于图 2，在 L₁ 后 10 km 处设置 100 Ω 接地故障，本文与文献[33]选线结果见表 20。根据原文设置线路 L₁ 的长度为 15 km、L₂—L₅ 的长度均为 10 km，在 L₁ 后 5 km 处设置 100 Ω 负极接地故障，文献[34]计算结果见表 20，数据窗长度见表 21。

文献[33]利用滑动平均滤波方法提取零模电流的特征量，对毛刺、高频等进行平滑处理，减少了原始采样数据的波动，提取零模电流的变化趋势，

再计算每条馈线两端特征量的相关性系数，若相关性系数大于 0.6，判定该线路为故障馈线，该方法易受过渡电阻的影响，当过渡电阻值较小时，由于零模电流变化明显，该方法的准确性较高，由表 20 可得，文献[33]能够正确选择故障馈线。由表 21 可得，原文所需数据窗为 13 ms，导致速动性较差。且当过渡电阻逐渐增大时，零模电流在总体的宏观趋势上逐渐减小。

表 20 适应性对比

Table 20 Adaptive criteria comparison

方法	判据	计算结果	选线	正确
本文	凹→凸?	[凸→凹, 凹→凸, 凹→凸, 凹→凸, 凹→凸]	L ₁	是
文献[33]	相关性系数 > 0.6?	[0.996, -0.943, -0.954, -0.936, -0.975]	L ₁	是
文献[34]	$\bar{C} > 0$ $\eta \leq \delta?$ $N_{um} > K_{rel}N?$	$\bar{C} = [-11.47, 2.87, 2.87, 2.87, 2.87]$ $\eta\% = [341.1, 341.0, 341.0, 341.0, 341.1]$ $N_{um} = [18, 39, 39, 39, 39]$	L ₁	是

表 21 数据窗对比

Table 21 Comparison of data window

方法	数据窗长	对比
本文	3 ms	短
文献[33]	13 ms	超长
文献[34]	3.5 ms	长

文献[34]根据各馈线暂态零模电压和电流计算零模故障网络的的对地电容序列，利用计算电容平均值极性 \bar{C} 、计算电容波动偏差 η 、计算电容正值个数 N_{um} 检测故障馈线，其中 δ 为波动偏差， K_{rel} 为可靠系数， N 为计算电容个数。当线路含有一定强度的噪声时，原文通过集总参数模型选取特征频段降低了噪声对对地电容序列的影响。由表 20 可得，文献[34]能够正确识别故障馈线，由于所选数据多为暂态部分，零模电压、电流受控制参数的影响较大，会导致计算电容序列波动严重，极易造成误判。馈线 L₁、L₂ 的计算电容值序列如图 18 所示，数值变化波动很大，影响选线的准确性。

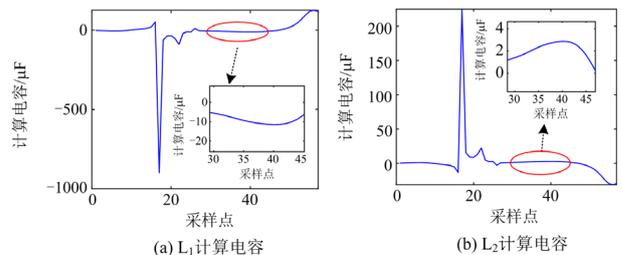


图 18 计算电容值序列

Fig. 18 Capacitance sequence calculation

综上所述, 文献[33]受通信延迟的影响, 降低了选线的准确性, 且该判据所需的数据窗较长, 导致速动性较差。文献[34]无需通信, 但所选数据多为暂态部分, 零模电压、电流受控制参数、滤波效果的影响较大, 从而影响计算电容序列, 导致选线结果不准确。本文方法能够在高阻故障状态下正确选线, 无需数据通信, 受过渡电阻、采样频率、数据窗长、噪声等因素影响较小, 仅对零模电流进行采样, 具有较好速动性。

6 结论

本文针对单端柔性直流配电网的单极接地故障, 提出了一种基于零模电流拐点密集区凹凸波动特性测度的直流配网故障检测方法, 该保护方法具有以下特点:

1) 提出基于拐点密集区的微观测度方法。本文利用 VMD 对零模电流进行处理, 通过皮尔逊相关系数得到特征分量, 然后通过计算特征分量的二阶导数, 实现微观层面下零模电流拐点密集区的选择, 利用拐点密集区这一物理意义有效表达了故障馈线与健全馈线零模电流方向完全相反的特征。

2) 适用于直流配网的超高速保护方案。本文仅对拐点密集区内的 7 个采样点进行处理, 数据窗长的选择可以根据系统采样频率等因素进行调整, 满足直流配网对保护速动性和选择性的要求, 且受数据窗长、采样频率、故障位置、噪声等因素的影响较小, 具有较高的适用性。

本文保护方案针对辐射状柔性直流配电系统发生单相接地故障时, 基于零模电流波形的微观层面进行选线, 算法能识别大部分故障。但含噪声的高阻工况下, 由于波形会发生明显的干扰, 导致选线准确率降低, 因此, 在今后的研究中将对算法做进一步改善。

参考文献

[1] HE Jinghan, HE Keao, CHEN Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 151-165.

[2] 王晨清, 陈实, 齐贝贝, 等. 基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 2-10.

WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, et al. An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 2-10.

[3] 杨贵军, 莫云晓, 龙英云, 等. 模块化多电平换流器子

模块检测技术研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 170-178.

YANG Guijun, MO Yunxiao, LONG Yingyun, et al. Research on detection technology of sub-model of modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 170-178.

[4] 刘翼肇, 王金浩, 左鹏飞, 等. 基于故障电流积分比的直流配电网极间短路选线方案[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 8-16.

LIU Yizhao, WANG Jinhao, ZUO Pengfei, et al. A method of pole-to-pole fault selection for dc distribution networks based on the ratio of fault current integral[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 8-16.

[5] 汪洋, 杨仕伟, 王宝华, 等. 基于深度置信网络的交直流配电网直流故障检测技术[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 251-259.

WANG Yang, YANG Shiwei, WANG Baohua, et al. DC fault detection technology for AC/DC distribution network based on DBN[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 251-259.

[6] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 48-58.

CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinghong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 48-58.

[7] 王晓卫, 高杰, 吴磊, 等. 柔性直流配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2806-2819.

WANG Xiaowei, GAO Jie, WU Lei, et al. A high impedance fault detection method for flexible DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2806-2819.

[8] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.

GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.

[9] 彭开军, 周国梁, 李文津, 等. 采用二极管整流单元和模块化多电平换流器的混合型远海风电送出方案[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 166-175.

PENG Kaijun, ZHOU Guoliang, LI Wenjin, et al. Hybrid offshore wind power delivery scheme using diode rectifier unit and modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 166-175.

[10] 赵建阳, 张福民. 一种低谐波和零电流关断换流器运

- 行特性的研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 52-61.
ZHAO Jianyang, ZHANG Fumin. Research on operation performance of low harmonic and zero current switching converter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 52-61.
- [11] 杨定乾, 丁杨. 换流器换相脉冲相位分布的仿真及实测分析[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 211-220.
YANG Dingqian, DING Yang. Simulation and actual measurement analysis on phase distribution of commutation pulses of converter[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 211-220.
- [12] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1740-1749.
SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1740-1749.
- [13] 毕天姝, 王帅, 贾科, 等. 基于短时能量的多端柔性直流单极接地故障线路识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 689-695.
BI Tianshu, WANG Shuai, JIA Ke, et al. Short-term energy based approach for monopolar grounding line identification in MMC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 689-695.
- [14] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [15] 张韵琦, 王聪博, 余越, 等. 基于双端初始电流行波时频矩阵相似度的柔性直流输电线路保护原理[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2023-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230308.0917.006.html>.
ZHANG Yunqi, WANG Congbo, YU Yue, et al. The VSC-HVDC line protection principle based on the similarity of the double-ended initial current traveling wave time-frequency matrices[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2023-10-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230308.0917.006.html>.
- [16] YANG S, XIANG W, LI R, et al. An improved DC fault protection algorithm for MMC HVDC grids based on modal-domain analysis[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4086-4099.
- [17] LI B, LI Y, HE J, et al. A novel single-ended transient-voltage-based protection strategy for flexible DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 925-937.
- [18] 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.
- [19] 张希鹏, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于 VPC-EMTR 理论的直流配电网故障选线[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1729-1739.
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault line selection in DC distribution network based on VPC-EMTR theory[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1729-1739.
- [20] 贾勇勇, 高尚, 司鑫尧, 等. 基于高阻并联避雷器接地方式的柔性直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 166-173.
JIA Yongyong, GAO Shang, SI Xinyao, et al. Protection method of flexible DC power distribution network based on grounding mode with high resistor and arrester in parallel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 166-173.
- [21] 胡亚辉, 韦延方, 王鹏, 等. 基于 PCA 和 EEMD 的柔性直流配电网故障选线算法[J/OL]. 电源学报: 1-20 [2023-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20220211.1736.010.html>.
HU Yahui, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Fault location combinatorial algorithm of flexible DC distribution network based on PCA and EEMD[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-20[2023-10-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20220211.1736.010.html>.
- [22] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4269-4277.
XU Ruidong, CHANG Zhongxue, SONG Guobing, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4269-4277.
- [23] SATPATHI K, YEAP Y M, UKIL A, et al. Short-time Fourier transform based transient analysis of VSC interfaced point-to-point DC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4080-4091.
- [24] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3557.

- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [25] 戴志辉, 葛红波, 陈冰研, 等. 柔性中压直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 78-86.
- DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Bingyan, et al. Line protection schemes for flexible medium voltage DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 78-86.
- [26] 田阳, 王晓卫, 刘伟博, 等. 基于多故障特征融合的直流配电网单极故障选线方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-11[2023-10-19]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001316>.
- TIAN Yang, WANG Xiaowei, LIU Weibo, et al. Single-pole fault feeder selection method for DC distribution network base on multi-fault feature fusion[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSSA: 1-11[2023-10-19]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001316>.
- [27] 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.
- [28] 王晓卫, 刘伟博, 郭亮, 等. 基于不同时段内积投影的灵活接地系统高阻故障选线方法[J/OL]. 电工技术学报: 1-14[2023-06-30]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221878.
- WANG Xiaowei, LIU Weibo, GUO Liang, et al. High impedance fault line selection method based on inner product projection of different time periods for flexible grounding systems[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-14[2023-06-30]. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221878.
- [29] 高杰, 谷雨, 潘祎希, 等. 基于经验小波变换和高频分量的微电网保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 50-56.
- GAO Jie, GU Yu, PAN Yixi, et al. A microgrid protection method based on an empirical wavelet transform and a high frequency component[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 50-56.
- [30] 罗德荣, 贺锐智, 黄守道, 等. 模块化多电平变流器子模块电压分组检测中过电压防护策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2957-2969.
- LUO Derong, HE Ruizhi, HUANG Shoudao, et al. Over-voltage protection strategy for sub-module of modular multilevel converter with reduced sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2957-2969.
- [31] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [32] 贾科, 陈淼, 施志明, 等. 基于限流电抗器电压积分凹凸性的柔性直流输电线路单端量保护方案[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4498-4505.
- JIA Ke, CHEN Miao, SHI Zhiming, et al. Single-ended protection scheme of flexible DC transmission lines based on concavity and convexity of the current-limiting reactor voltage integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4498-4505.
- [33] 左鹏飞, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 86-96.
- ZUO Pengfei, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Single-pole ground selection method for DC distribution networks based on zero-mode current correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 86-96.
- [34] SONG Guobing, LUO Juan, GAO Shuping, et al. Detection method for single-pole-grounded faulty feeder based on parameter identification in MVDC distribution grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 85-92.

收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2024-01-15

作者简介:

王晓卫(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、配电网接地故障处理等; E-mail: proceedings@126.com

田影(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流配电网故障检测。E-mail: 1529296124@qq.com

(编辑 姜新丽)