

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201292

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

张鑫宇¹, 樊艳芳¹, 马健², 刘源¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 国网新疆电力有限公司
电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 光伏、风电等低碳清洁可再生能源和多样化负荷的接入促使直流配电网成为新的研究方向。为提高其供电可靠性, 需对配电网系统进行故障特征分析。针对直流故障线路与换流器直流侧电容构成放电回路的前期阶段, 提出一种适用于柔性直流配电线路的纵联保护新方法。该方法基于最小二乘法, 并以故障电流采样数据拟合曲线斜率的方式, 识别故障后直流线路两端电流的发展趋势, 进而快速准确地判别直流线路故障。通过 PSCAD/EMTDC 建模仿真, 验证了该方法的有效性及其较高的可靠性。

关键词: 柔性直流配电网; 纵联保护; 故障电流特性; 最小二乘法

Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics

ZHANG Xinyu¹, FAN Yanfang¹, MA Jian², LIU Yuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Electric Power Research
Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: The integration of low-carbon clean renewable energy such as photovoltaics and wind power and diverse loads have projected studies of the DC distribution network into a new direction. To improve the reliability of power supply, the fault characteristics of a distribution network system are analyzed. Considering the early stage of the discharge circuit formed by the DC fault line and the DC side capacitor of the converter, a new pilot protection method suitable for flexible DC distribution lines is proposed. The method is based on the least squares method, and the slope of the curve is fitted by the fault current sampling data to identify the development trend of the current at both ends of the DC line after the fault, and then to identify DC line faults quickly and accurately. Through PSCAD/EMTDC modeling and simulation, the results show that the method is effective and reliable.

This work is supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 51877185) and the Xinjiang Uygur Autonomous Region University Scientific Research Key Project (No. XJEDU2021I009).

Key words: flexible DC distribution network; pilot protection; fault current characteristics; least square method

0 引言

随着大功率电力电子器件不断革新, 高压、大功率换流技术日趋成熟, 国内外已建成并投运若干多端柔性直流输电工程^[1-3]。在接入光伏、储能等分布式电源时, 与传统交流配电系统相比, 柔性直流配电网具有换流环节少、节约成本、控制灵活、易于互联、输送容量大等优势^[4-7]。同时, 诸如城市轨道交通系统、化工厂等直流负荷直接接入直流配网可降低损耗^[8]。但柔性直流配电系统阻尼小, 当发

生线路故障时故障电流瞬间上升, 造成严重的过流现象^[9-10]。因此, 直流配电网的故障诊断技术具有重要研究意义。

现有的直流配电网保护多沿用柔性直流输电系统的保护机理, 按信息量采集方式可分为单端量保护和双端量保护。对于单端量保护: 文献[11]通过注入电流信号来实现主动阻抗估计保护; 文献[12]利用边界元件电抗器和小波变换提取高频段的暂态电流能量来区分区内、外故障; 文献[13-14]利用故障后直流线路单端限流电感电压的变化率和限流电感线路侧电压的变化率来实现故障检测和保护, 但电抗器的安装与否需考虑直流配电网的实际需求; 文献[15]将过电流保护分为近端和远端两段式结构, 虽

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185); 新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU2021I009)

然可准确判别故障类型, 但无法保证速动性。对于双端量保护: 文献[16-17]提出基于行波的保护方法, 方法仅适用于高压直流输电系统和柔性直流输电系统, 而直流配电网的输送距离较短, 所需采样频率高达几 MHz, 目前的保护装置无法满足; 文献[18]通过采用高压直流系统中高频段电流、电压值计算换流器直流侧滤波电容的方式, 与理论值对比判别故障区域, 此方法不受过渡电阻影响且计算简易, 但在直流配电网中还有待验证; 文献[19]利用暂态高频阻抗的比较实现高压线路快速保护, 文献[20]基于该方法提出适用于无直流滤波器的直流配电网保护方法, 但算法较复杂; 文献[21]利用小波变换等效行波差动法, 虽然能降低对通信的依赖, 但行波反射在配电网中受距离限制; 文献[22]利用电流方差替代电流值的方式构造判据, 可准确判别区内外故障, 但其整定值需参照仿真验算结果。

综上所述, 现有的单端量和双端量保护原理在柔性直流配电网中的适应性存在一定不足。为提高配电网可靠性, 本文首先对多端柔性直流配电网进行故障特征分析, 针对其故障电流变化特征提出一种新的保护方法。该方法基于最小二乘法, 以直流线路两端故障电流数据拟合曲线斜率的方法, 构造直流线路故障判据, 算法简单, 保护原理易于实现, 且不受分布电容影响, 耐受过渡电阻能力较强。利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建模型进行时域仿真, 并用 Matlab 对数据进行处理, 结果表明, 所提方法的理论与仿真结果相符, 在柔性直流配电线路中有较好的适应性。

1 柔性直流配电网拓扑结构

本文参考文献[5,9,23]探讨柔性直流配电网系统, 构建如图 1 所示的 4 端柔性直流配电网拓扑。因直流配电网电压等级低, 相较于高压直流输电, 线路传输容量小, 交流系统可通过成本低、控制简单且可靠性高的三相两电平换流器 VSC1、VSC2 与直流电网相连。储能单元、光伏发电系统和直流负荷通过双向隔离型直流变换器 DC/DC1、DC/DC2 与直流电网相连^[20]。

直流配电网拓扑中, VSC1 采用定电压和定无功控制方式, VSC2 采用定有功和定无功控制方式, DC/DC1 配备有 MPPT 控制及定功率控制、DC/DC2 采用定功率控制方式。对于接地方式, 交流系统与 VSC 连接的变压器采用 YNd 接法, 如此可阻断交流侧与直流线路单极接地故障构成回路, 便于直流侧故障分析^[24]; 直流侧采用传统 VSC-HVDC 系统常用的高阻接地方式, 单极接地故障不会造成严重

过流, 可使系统带故障运行一段时间^[25]。因此, 本文重点关注双极短路故障。直流线路采用电力电缆, 且两端配有断路器和测量元件, 电压等级为 ± 10 kV。本文通过分析直流配电线路的故障特征, 对适用于直流配电网的保护方法展开研究。

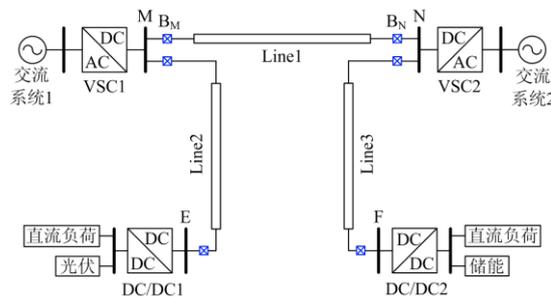


图 1 柔性直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Flexible DC distribution network topology

2 柔性直流配电网故障特征分析

直流配电网的线路故障主要包括极间短路、单极接地和断线故障, 本文以图 1 中的直流线路 Line1 为例着重分析极间短路的故障特征。文献[26]对极间短路故障的暂态过程进行了相关分析, 即包括直流电容放电阶段、二极管自然换向阶段、二极管自然导通阶段和不可控整流阶段。单极接地故障的暂态过程与极间短路相似, 虽不存在二极管自然导通阶段, 但同样有直流电容放电过程, 其放电回路如图 2 所示, 回路 1、回路 2 分别对应单极接地和极间短路故障。

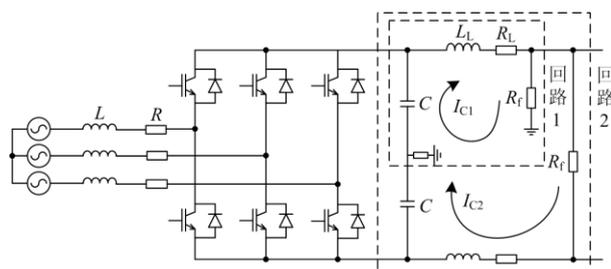


图 2 直流线路故障时电容放电回路

Fig. 2 Capacitor discharge circuit when DC line fails

以极间短路故障为例, 其暂态过程如图 3 所示。故障前直流线路电压与电流分别处于额定值, 即 U_0 、 I_0 。直流线路在 t_1 时刻发生故障, $t_1 \sim t_2$ 为暂态过程的第一阶段, 在该阶段内换流器直流侧电容瞬间向故障点放电, 直流电压下降, 短路电流骤升; 当直流电压低于交流系统线电压时, 进入暂态过程的第二阶段, 即 $t_2 \sim t_3$, 在该阶段内二极管自由换向, 经过并联电容共同向故障点继续放电; 当直流电压降为 0 后, 进入暂态过程的第三阶段, 即 $t_3 \sim t_4$, 该

阶段所有二极管自然导通，由线路电感续流，直至电流下降至与交流系统不控整流的电流相等时，进入暂态过程的最终阶段。

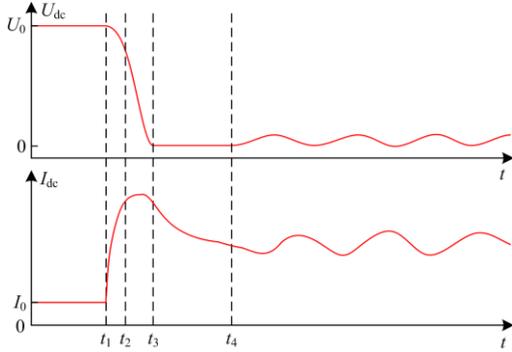


图3 直流线路极间短路暂态阶段

Fig. 3 DC line bipolar short circuit fault transient stages

暂态过程的四个阶段并非依次出现，但无论发生极间短路还是单极接地故障，必会经历首段电容放电过程。该阶段直流电流激增，开关管关断，为避免故障带来严重影响，保护装置需在几毫秒内准确判别故障类型。因此本文针对直流电容放电阶段进行故障分析，基于故障特征提出适当的故障判据。

当直流线路区内发生双极短路故障时，以故障 f_1 为例，其故障电流变化趋势如图 4 所示。其中，M、N 为线路两侧直流母线，p、n 分别为正、负极线路， I_{Mp} 、 I_{Np} 为正极线路 M、N 两侧的故障电流， I_{Mn} 、 I_{Nn} 为负极线路 M、N 两侧的故障电流。规定正极电流参考正方向为母线流向线路，负极电流参考正方向为线路流向母线，且正常情况时功率流向为 M 到 N，即正极负荷电流为 M 到 N，负极相反，后文相同。

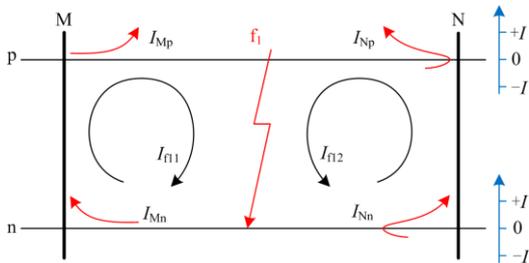


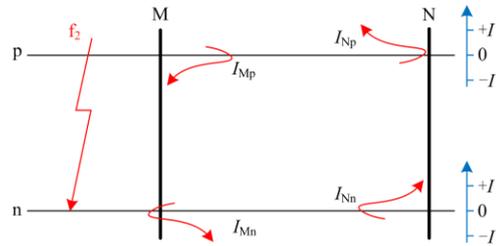
图4 区内故障 f_1 电流变化趋势

Fig. 4 Current change trend of in-zone fault f_1

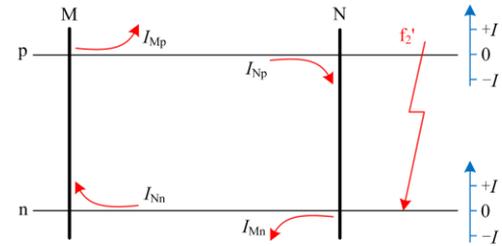
由图 4 可知，发生区内极间短路故障时，故障电流变化趋势如红色曲线所示，规定红色曲线绘制于正、负极线路上的部分表示与电流参考正方向相同，绘制于正、负极线路下方的部分则表示与电流参考正方向相反，且其增减趋势对应电流数值(带

正负号)大小的变化(后文相同)。当线路发生极间故障时，正极线路故障电流流向故障点，负极线路与之相反，分别构成 I_{f11} 和 I_{f12} 两个回路。参考图 4 中的蓝色示意纵坐标轴，规定正、负极线路所在直线与纵坐标交点为原点，则： I_{Mp} 表现为与参考方向相同的正值，且为增大趋势， I_{Np} 初始表现为与参考方向相反的值，增大到 0 后转变为与参考方向相同的正值，再继续增大；同理， I_{Mn} 表现为正向增大， I_{Nn} 表现为先反向增大至 0 再继续正向增大。由此可知，发生区内极间短路故障时，正、负极线路两端电流均呈增大趋势。

当直流线路区外发生极间短路故障时，M 侧故障 f_2 和 N 侧故障 f_2' 的故障电流变化趋势如图 5 所示。同理分析可知，M 侧发生区外故障时，双极线路两端电流呈现一减一增的趋势，N 侧发生区外故障时，双极线路两端电流呈现一增一减的趋势。



(a) M 侧区外故障 f_2 电流变化趋势



(b) N 侧区外故障 f_2' 电流变化趋势

图5 区外故障 f_2 和 f_2' 的电流变化趋势

Fig. 5 Current change trend of out-zone fault f_2 and f_2'

综上所述，直流线路区内、外故障电流的变化特征如表 1 所示。总结可知，故障区域与故障电流的变化趋势密切相关。

表 1 故障电流变化趋势

Table 1 Fault current change trend

故障类型	正极线路		负极线路	
	M 端	N 端	M 端	N 端
区内极间短路	↑	↑	↑	↑
区外 M 侧故障	↓	↑	↓	↑
区外 N 侧故障	↑	↓	↑	↓

3 基于最小二乘法拟合电流斜率分布的纵联保护新方法

鉴于电容放电初期阶段故障电流的变化特征, 可将故障电流变化趋势与最小二乘法相结合, 通过拟合曲线斜率的方式, 构造故障判据。

3.1 最小二乘法的引入

最小二乘法又称曲线拟合, 是诸多科学领域广泛应用的数学工具。通过若干二维数据点的坐标 (x_i, y_i) 即可拟合出与数据点变化趋势最贴近的曲线及其斜率。其一元线性拟合函数的斜率表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} y = kx + b \\ k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \\ b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{k}{n} \sum_{i=1}^n x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 、 x 为一次函数变量; k 为拟合斜率; b 为与纵坐标的交点; x_i 、 y_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为待拟合数据点的横、纵坐标。

由式(1)可知: 当一次函数斜率大于 0 时, 各数据点 (x_i, y_i) 呈现正相关性, 即 x_i 、 y_i 在横、纵坐标轴上的分布趋势相同, 具体为 x_i 、 y_i 同增或 x_i 、 y_i 同减; 反之, 当一次函数斜率小于 0 时, 各数据点 (x_i, y_i) 呈现负相关性, 即 x_i 、 y_i 在横、纵坐标轴上的分布趋势相反, 具体为 x_i 增 y_i 减或 x_i 减 y_i 增。当配电网直流线路发生故障时, 故障初期电流变化趋势可近似为时间与电流的一次函数, 对线路两端故障电流同时采样, 此时 x_i 对应单极线路一端故障电流采样数据, y_i 对应另一端故障电流采样数据, 依据式(1)即可拟合出由线路两端故障电流数据构成的曲线, 当线路两端故障电流变化趋势相同时, 该曲线斜率大于 0, 反之曲线斜率小于 0。

引入最小二乘法的优点在于, 仅需能够满足拟合出曲线变化趋势的数据量, 即可将其分布至二维坐标系拟合出曲线斜率。结合表 1 总结的故障特征, 以期在电容放电前期阶段通过对故障电流波形数据进一步拟合, 得出适用于直流配电线路的故障判据。

3.2 构造故障判据

结合表 1 所示的故障特征可知, 当发生区内极间短路故障时, 令正极 M 侧电流采样数据为 x_i , N 侧电流采样数据为 y_i , 则故障初期阶段数据点 (x_i, y_i)

呈正相关, 拟合曲线斜率 k 大于 0; 再令负极 M 侧电流采样数据为 x_i , N 侧电流采样数据为 y_i , 则 (x_i, y_i) 也呈正相关, 拟合曲线斜率 k 大于 0。而当发生区外故障时, 同理可知, 不论区外故障发生在 M 侧还是 N 侧, 正、负极线路两端故障电流拟合曲线的斜率 k 均小于 0。综上所述, 可利用拟合曲线斜率 k 的大小构造保护判据。当同极直流线路两端故障电流拟合的 k 满足 $k \in (0, +\infty)$ 时, 认为两端故障电流变化趋势相同; 当 k 满足 $k \in (-\infty, 0)$ 时, 认为两端故障电流变化趋势相反。为简化算法的编程和运算, 设计线路两端故障电流变化趋势的判别函数如式(2)所示。

$$B_j = \begin{cases} 1, & k \in (0, +\infty) \\ -1, & k \in (-\infty, 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, B_j 为判别因子, j 代表正极 p 或负极 n。

综上所述, 基于 B_j 简化后的故障判据如表 2 所示。因曲线拟合过程仅需电容放电前期阶段的部分数据, 所以即使电流波形存在因干扰或测量误差造成的波动, 基于该判据的故障判别原理仍可准确识别故障区域。

表 2 基于 B_j 的故障判据

故障类型	B_p	B_n
区内极间短路	1	1
区外故障	-1	-1

3.3 故障判别流程

根据上一小节分析, 可将柔性直流配电网的直流线路故障诊断流程整合如图 6 所示, 包括启动判据、曲线拟合、故障判别以及选极判据 4 部分。

直流线路故障会引起过流、欠电压和正负极电压不均衡等现象, 以此构造保护启动判据, 通过实时采集数据计算 du/dt 和 di/dt 来实现。保护启动后, 提取直流线路两端故障电流数据, 用最小二乘法进行曲线拟合, 进而通过基于 B_j 的故障判据进行故障判别。当发生区内故障时, 相应直流断路器动作; 当区外故障时, 保护装置闭锁; 当出现区内外双极短路故障判据之外的情况时, 进入选极判据。选极判据依据单极接地故障时, 故障极电压降为 0, 非故障极电压翻倍的特性来判断。由于单极接地故障不会造成严重过流, 可带故障运行一段时间, 因此对单极故障保护的速动性要求不高, 为保证系统高效运行, 当判别出单极故障时, 保护拒动, 否则重新检测, 保护复位。

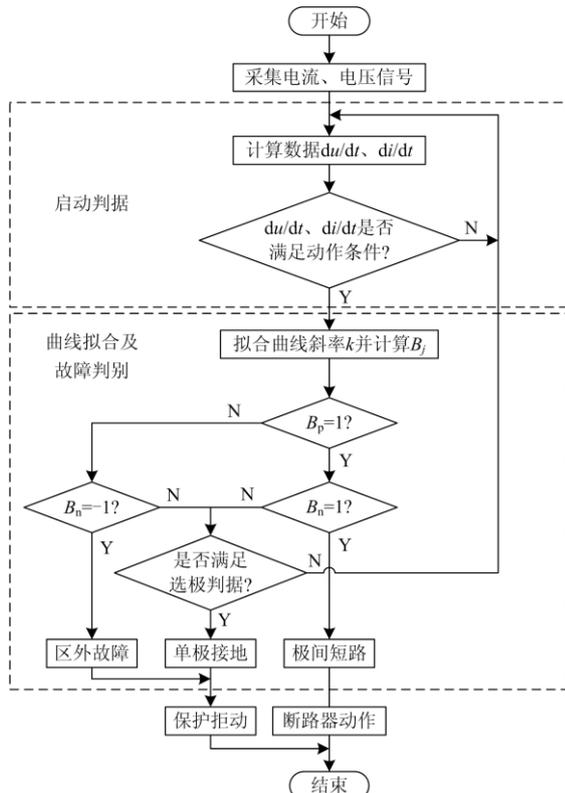


图 6 故障判别流程

Fig. 6 Fault identification flow chart

4 仿真验证

为验证基于故障电流斜率分布的纵联保护新方法的有效性，在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的 4 端柔性直流配电网模型。换流器具体参数如表 3 所示，直流线路参数如表 4 所示。

表 3 换流器参数

Table 3 Parameters of converters

换流器名称	电压变比	额定容量/MW
VSC1	AC10 kV/DC ±10 kV	5
VSC2	AC10 kV/DC ±10 kV	5
DC/DC1	DC ±10 kV/DC0.4 kV	-3~3
DC/DC2	DC ±10 kV/DC0.4 kV	-2~2

表 4 直流线路参数

Table 4 Parameters of DC lines

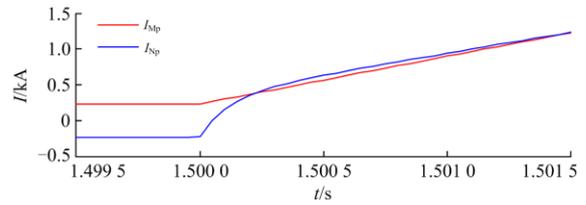
线路名称	线路长度/km	线路电阻/Ω	线路电感/mH
Line1	10	0.278	3.18
Line2	5	0.139	1.59
Line3	5	0.139	1.59

为保证计算结果的快速性与准确性，设定采样频率为实际工程中常用的 10 kHz，考虑到换流器闭锁在故障后 5 ms 内，继电器动作耗时 3 ms，因此

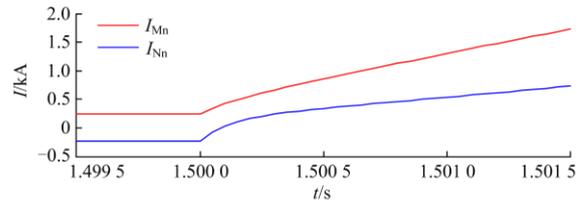
保护装置的数据处理时间不到 2 ms，故提取故障后 1 ms 数据窗，即由 10 个数据点进行曲线拟合，并由其斜率实现故障判别。以线路 Line1 为例，由于配电网系统直流侧经 2 500 Ω 大电阻接地，单极接地故障不会引起严重过流，因此重点针对区内双极短路故障 f₁ 和区外故障 f₂ 做仿真验证，将仿真结果与理论相比，验证保护方法的有效性。

4.1 区内故障

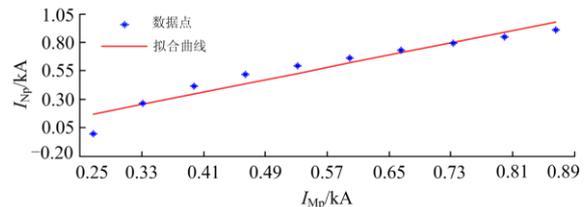
设置在系统运行至 1.5 s 时刻发生双极短路故障 f₁，故障点距 M 端 2 km，测得正、负极线路两端故障电流以及采样数据拟合曲线如图 7 所示。



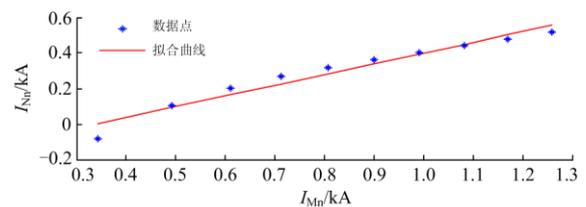
(a) 正极线路两端电流



(b) 负极线路两端电流



(c) 正极线路故障电流采样结果及拟合曲线



(d) 负极线路故障电流采样结果及拟合曲线

图 7 区内极间短路故障仿真结果

Fig. 7 Simulation results of in-zone bipolar short circuit fault

由图 7(a)、(b)可知，故障后正、负极线路 M 侧、N 侧电流均呈上升趋势，将两端电流采样数据分别分布到横、纵坐标，此时对应的新数据点以及其拟合曲线如图 7(c)、(d)所示，其中图 7(c)的曲线斜率 k_p 为 1.276 7，图 7(d)曲线斜率 k_n 为 0.574 4。由算法得出 $B_p=1$ 且 $B_n=1$ ，与极间短路故障理论相对应，

可知极间短路故障判据准确有效。

4.2 区外故障

以 M 侧区外极间短路故障 f_2 为例, 设置在系统运行至 1.5 s 时刻发生故障 f_2 , 故障点距 M 端 0.5 km, 测得正、负极线路两端故障电流以及采样数据拟合曲线如图 8 所示。

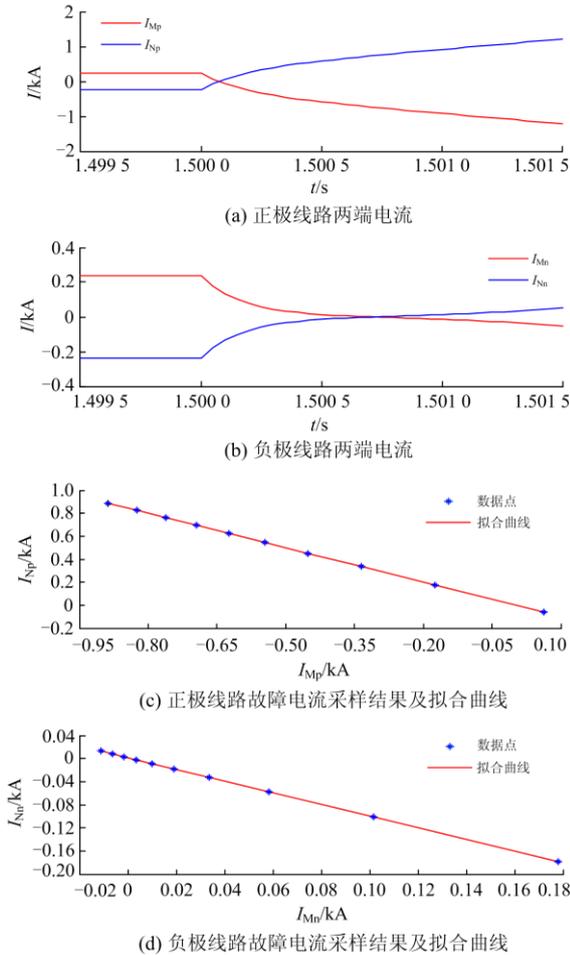


图 8 区外故障仿真结果

Fig. 8 Simulation results of out-zone bipolar short circuit fault

由图 8(a)、(b)可知, 故障发生瞬间, 正、负极线路两端电流均呈现一增一减的变化趋势, 因此其对应新数据点及拟合曲线如图 8(c)、(d)所示, 斜率 k_p 为-1.0, k_n 为-1.0。由算法得出 $B_p=-1$ 且 $B_n=-1$, 与区外故障理论相对应。由于 N 侧区外故障的理论 M 侧相同, 故此处不再赘述。综上可知区外故障判据准确有效。

4.3 分布电容的影响

当考虑线路存在分布电容时, 其充放电过程会影响线路两端测得的电流波形。为验证本文所提保护方法在分布电容影响下的判别能力, 以区内极间

短路故障 f_1 为例, 将本文所用型号为 DC-YJV62-400 mm² 的电缆线路分布电容参数通过 Π 型等效后进行仿真验证, 结果如图 9 所示。且对截面积为 500 mm² 和 630 mm² 的电缆线路也进行了仿真, 对应采样点拟合曲线斜率及判别结果如表 5 所示。

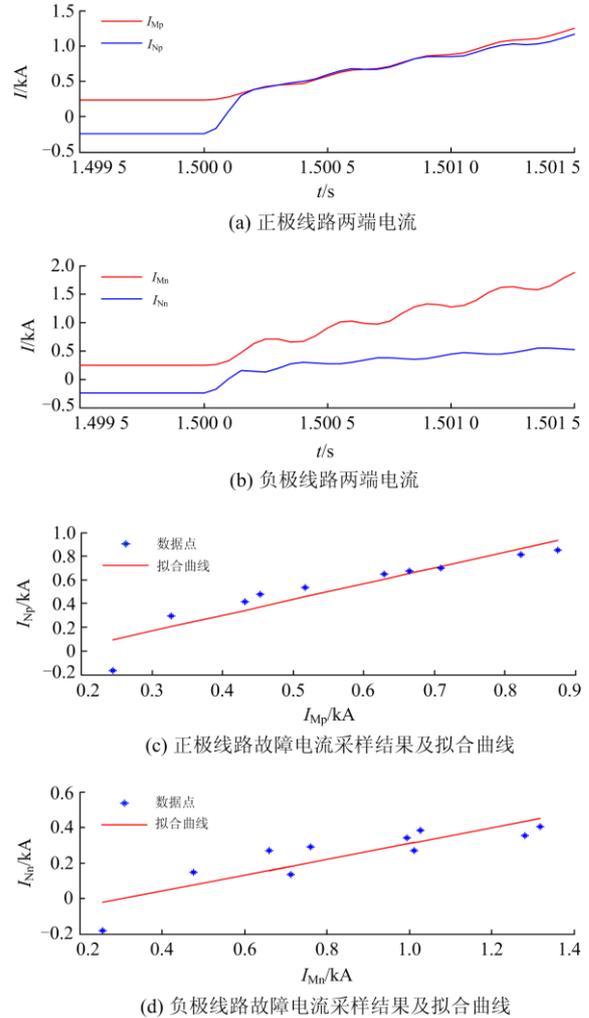


图 9 受分布电容影响时故障 f_2 的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of fault f_2 affected by distributed capacitance

表 5 受分布电容影响时故障 f_2 的判别结果

Table 5 Discrimination results of fault f_2 affected by distributed capacitance

电缆截面 积/mm ²	分布电容/ ($\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1}$)	k_p	k_n	B_p	B_n	判别结果
400	0.42	1.334 0	0.442 4	1	1	区内极间
500	0.48	1.335 5	0.428 3	1	1	区内极间
630	0.53	1.343 1	0.443 1	1	1	区内极间

由图 9 和表 5 可知, 当考虑电缆线路分布电容的影响时, 虽会造成电流波动, 但不影响故障电流

总体的变化趋势，仍能准确识别故障类型。因此保护新方法具有耐受该电压等级下电缆线路分布电容的能力。

4.4 过渡电阻的影响

考虑过渡电阻对故障判据的影响时，故障电流幅值有所降低，但本文所提方法依据线路两端故障电流变化趋势，无需具体电流幅值参与判别，因此理论上可不受其影响。以故障 f_1 为例，在仿真过程中依次设置 1、5、10、15、20 Ω 的过渡电阻，对应采样点拟合曲线斜率及判别结果如表 6 所示。

表 6 受过渡电阻影响时故障 f_1 的判别结果

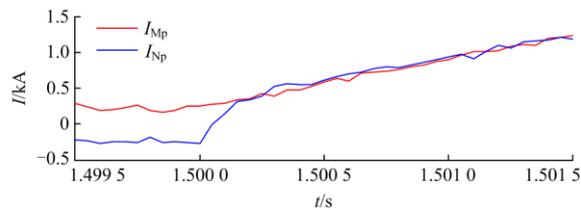
Table 6 Discrimination results of fault f_1 affected by transition resistance

by transition resistance					
过渡电阻/ Ω	k_p	k_n	B_p	B_n	判别结果
1	1.236 7	0.561 3	1	1	区内极间
5	1.081 8	0.501 8	1	1	区内极间
10	0.913 3	0.432 9	1	1	区内极间
15	0.767 4	0.369 8	1	1	区内极间
20	0.639 3	0.311 8	1	1	区内极间

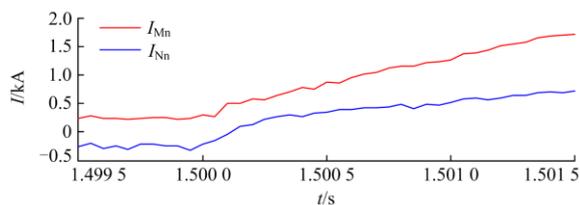
由表 6 所得仿真结果可知，过渡电阻越大，拟合曲线斜率越小，但仍可满足故障判据，判别结果准确无误。因此本文所提保护方法能够耐受 20 Ω 的过渡电阻，可满足直流配电网保护方法对过渡电阻的耐受要求^[12]。

4.5 噪声干扰的影响

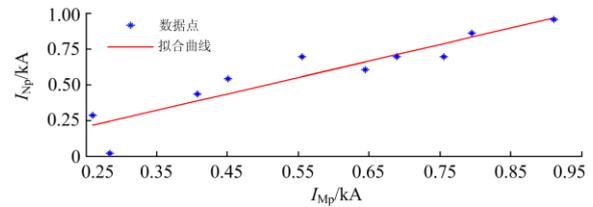
在实际柔性直流配电网运行过程中，电流传感器存在一定误差，且换流器中的电力电子器件存在相互干扰，为验证各种干扰对保护方法的影响，在测得的电流信号中加入噪声进行模拟。以区内极间短路故障 f_1 为例，在故障电流信号中加入信噪比为 30 dB 的噪声干扰^[20]，仿真得到正、负极线路两端故障电流波形和拟合曲线如图 10 所示。



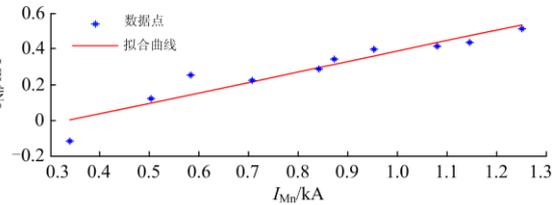
(a) 正极线路两端电流



(b) 负极线路两端电流



(c) 正极线路故障电流采样结果及拟合曲线



(d) 负极线路故障电流采样结果及拟合曲线

图 10 考虑噪声干扰的故障 f_1 仿真结果

Fig. 10 Simulation results of fault f_1 affected by interference

由图 10 可知，电流波形受噪声干扰产生波动，且采样所得数据点较无干扰时分布凌乱，但拟合曲线基本不受影响。由图 10(c)和图 10(d)可知，一些数据虽然偏离了拟合曲线，但其斜率仍大于 0，由算法得出 $B_p=1$ 且 $B_n=1$ ，符合区内极间短路故障判据，保护依然正确动作。因此本文所提保护方案可在 30 dB 的噪声干扰下准确判别故障类型。

4.6 同步误差的影响

现有的通信通道分为光纤通道和复用通道，考虑到纵联保护的工程实际应用，光纤通道使用居多，传输延时为 204 km/ms^[27]，对于 20 km 以内短距离输电的直流配电网，传输耗时不到 0.1 ms，对于 10 kHz 的采样频率及 1 ms 的数据窗而言，采样数据可不受其影响。由于本文所提保护判据仅依据故障电流变化趋势以拟合曲线斜率，而线路两端电气量信号的同步误差不会改变故障电流变化趋势，因此同步误差对故障判别仍无影响。以故障 f_1 为例，考虑最大通信延时为 0.5 ms，依次设定不同情况的同步误差，判别结果如表 7 所示，结果表明该方案无需严格通信同步，可在 0.5 ms 的通信延时范围内准确判别故障类型。

表 7 受同步误差影响时故障 f_1 的判别结果

Table 7 Discrimination results of fault f_1 affected by synchronization error

synchronization error					
同步误差/ms	k_p	k_n	B_p	B_n	判别结果
0.1	1.065 7	0.469 1	1	1	区内极间
0.2	0.971 4	0.424 0	1	1	区内极间
0.3	0.928 1	0.405 4	1	1	区内极间
0.4	0.906 9	0.398 5	1	1	区内极间
0.5	0.895 4	0.396 8	1	1	区内极间

5 结论

本文以 4 端柔性直流配电网为研究背景, 通过分析其故障特征, 提出一种基于故障电流斜率特性的故障判别新方法, 并利用 PSCAD/EMTDC 搭建 ± 10 kV 配电网仿真模型, 得出以下结论。

1) 该保护方法应用最小二乘法将故障电流变化趋势与故障类型相对应, 算法简单易实现, 可准确识别故障区域, 有很好的选择性。

2) 与传统保护方法相比, 该方法仅需提取 1 ms 的数据窗, 且对数据精度要求不高, 可在故障初期电容放电前期阶段迅速准确地判别故障区域, 因此有很好的速动性。

3) 该保护方法具有耐受 20Ω 过渡电阻、30 dB 噪声干扰和 10 kV 电缆线路分布电容的能力, 且在 0.5 ms 的通信延时和同步误差影响下仍能准确判别故障类型, 因此灵敏性及可靠性高。

4) 该保护方法是针对线路两端均有电源的 4 端柔性直流配电网拓扑提出的纵联保护方法, 可同样适用于环网, 受电网运行方式的影响小。

参考文献

- [1] 刘黎, 蔡旭, 俞恩科, 等. 舟山多端柔性直流输电示范工程及其评估[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 79-88.
LIU Li, CAI Xu, YU Enke, et al. Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission demonstration project and its evaluation[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 79-88.
- [2] 马洲俊, 王勇, 吴峻恒, 等. 适应城市电网的多端柔性直流输电可行性分析及仿真研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 85-92.
MA Zhoujun, WANG Yong, WU Junheng, et al. Feasibility analysis and simulation of multi-terminal flexible HVDC transmission system for urban power grid[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 85-92.
- [3] 郭贤珊, 卢亚军, 郭庆雷. 张北柔性直流电网试验示范工程直流控制保护设计原则与验证[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 181-189.
GUO Xianshan, LU Yajun, GUO Qinglei. Design principle and verification of control and protection system for Zhangbei VSC-HVDC grid demonstration project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 181-189.
- [4] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 179-187.
ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 179-187.
- [5] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122.
XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [6] 韩笑, 刘建婷, 张益伟, 等. 柔性直流配网继电保护关键技术评述[J/OL]. 电测与仪表: 1-10[2020-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200806.1347.002.html>.
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Summary of key technology of relay protection in flexible DC distribution network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-10[2020-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200806.1347.002.html>.
- [7] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波, 等. 环状柔直配网线路的单端量保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6825-6836, 7117.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo, et al. Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6825-6836, 7117.
- [8] NILSSON D, SANNINO A. Efficiency analysis of low- and medium-voltage DC distribution systems[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, CO, USA: 2315-2321.
- [9] 贾科, 李论, 宣振文, 等. 基于扰动注入的柔性直流配电网主动故障定位及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 99-106.
JIA Ke, LI Lun, XUAN Zhenwen, et al. Study on fault location method and simulation for VSC-DC distribution network based on disturbance injection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 99-106.
- [10] XU Y, LIU J Y, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [11] CHRISTOPHER E, SUMNER M, THOMAS T D, et al. Fault location for a DC zonal electrical distribution systems using active impedance estimation[C] // 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, April 10-13, 2011, Alexandria, VA, USA: 310-314.
- [12] 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.
- [13] 祁晓敏, 裴玮, 李鲁阳, 等. 基于限流电感电压的多端

- 交直流混合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 537-545.
- QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. DC fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 537-545.
- [14] SNEATH J, RAJAPAKSE A. Fault detection and Interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA.
- [15] JIAO Z B, WANG Z, WANG X, et al. Protection schemes for distribution lines in DC power grid[C] // 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), November 3-6, 2015, Bangkok, Thailand: 1-6.
- [16] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-25.
- WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [17] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.
- DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759.
- [18] 宋国兵, 靳幸福, 冉孟兵, 等. 基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 76-82, 102.
- SONG Guobing, JIN Xingfu, RAN Mengbing, et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on shunt capacitance parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 76- 82, 102.
- [19] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 利用暂态测量阻抗的高压直流线路故障识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5504-5514, 5726.
- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for HVDC transmission lines based on transient measured-impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5504-5514, 5726.
- [20] 贾科, 宣振文, 李晨曦, 等. 柔性直流配电网中基于暂态高频阻抗比较的方向纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5343-5351.
- JIA Ke, XUAN Zhenwen, LI Chenxi, et al. A directional pilot protection based on phase angle of transient high-frequency impedance for flexible DC distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5343-5351.
- [21] TANG L X, DONG X Z, LUO S X, et al. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1359-1369.
- [22] 高仁栋, 吴在军, 范文超, 等. 双端直流配电网反时限电流方差保护方案[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2849-2859.
- GAO Rendong, WU Zaijun, FAN Wenchao, et al. Inverse time current variance protection scheme for two-terminal DC distribution system[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2849-2859.
- [23] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
- ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.
- [24] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2353-2364.
- DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2353-2364.
- [25] 贾科, 王聪博, 毕天姝, 等. 考虑过渡电阻影响的柔性直流配电系统电流突变量保护[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3187-3196.
- JIA Ke, WANG Congbo, BI Tianshu, et al. A DC current derivative protection with capability of resisting high resistance for flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3187-3196.
- [26] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
- LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [27] PETINO C, HEIDEMANN M, EICHHOFF D, et al. Application of multilevel full bridge converters in HVDC multiterminal systems[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 297-304.

收稿日期: 2020-10-27; 修回日期: 2021-02-21

作者简介:

张鑫宇(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流配电网保护与控制; E-mail: 2605657051@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 410849062@qq.com

马健(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术及保护与控制。E-mail: symajian@iCloud.com

(编辑 魏小丽)