

基于改进 K 聚类多判据融合的柔性直流配电网单极故障选线

陈新岗^{1,2}, 曾慧敏¹, 马志鹏¹, 张知先¹, 李松³, 张文轩¹

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054; 3. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054)

摘要: 小电流接地方式下的柔性直流配电网发生单极接地故障时, 故障特征量小, 故障识别难度大。为提高柔性直流配电网接地故障检测能力, 提出一种基于 K-means++多判据融合的柔性直流配电网单极故障选线方案。首先, 对线路故障电气量进行模量分解, 得到正常线路和故障线路零模电流、零模电压和零模功率的特征。然后, 根据各线路零模电流 Spearman 相关性、零模电流与零模电压夹角余弦值以及零模功率积分绝对值大小的差异, 构造 3 种故障选线判据。最后, 通过 K-means++算法对各线路 3 种选线结果进行分析, 可准确选出故障线路。在 PSCAD 进行仿真验证, 结果表明该方法耐过渡电阻、噪声干扰以及通信延时能力强, 有效提高了单极接地故障选线的准确性和可靠性。

关键词: 柔性直流配电网; 单极接地故障; K-means++; 故障选线

Single-pole fault line selection in flexible DC distribution networks based on improved K-means multi-criterion fusion

CHEN Xingang^{1,2}, ZENG Huimin¹, MA Zhipeng¹, ZHANG Zhixian¹, LI Song³, ZHANG Wenxuan¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China; 3. School of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In flexible DC distribution networks with low-current grounding mode, single-pole-to-ground faults exhibit weak fault characteristics, making fault identification challenging. To enhance fault detection capability, this paper proposes a single-pole fault line selection scheme for flexible DC distribution networks based on K-means++ multi-criterion fusion. First, modulus decomposition of electrical quantities during line faults is carried out, and the characteristics of zero-mode current, zero-mode voltage and zero-mode power for both normal and faulty lines are obtained. Then, according to the differences in the Spearman correlation of zero-mode current, the cosine of the angle between zero-mode current and voltage, and the absolute value of the zero-mode power integral, three fault line selection criteria are constructed. Finally, the K-means++ algorithm is used to analyze the results of the three criteria for each line, enabling accurate identification of the fault line. Simulations in PSCAD show that the proposed method has strong resistance to transition resistance, noise interference, and communication delay, significantly improving the accuracy and reliability of single-pole-to-ground fault line selection.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2023NSCQ-MSX0337).

Key words: flexible DC distribution network; single-pole-to-ground fault; K-means++; fault line selection

0 引言

随着光伏和风电等新能源的快速发展, 以及直

流充电桩和数据中心等直流负荷的不断增加, 直流配电网成为国内外研究热点^[1-3]。相较于交流配电网, 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流配电网能更好地消纳分布式新能源和直流负荷, 具有线路损耗小、传输容量大和电能质量好等优势, 其中多端柔性直流配电网在供电可靠性方面具有明显优势^[4-5]。

柔性直流配电网阻尼小, 故障发展迅速, 系统

基金项目: 重庆市自然科学基金项目资助 (CSTB2023NSCQ-MSX0337); 重庆市教育委员会科学技术研究项目资助 (KJZD-K202101103); 重庆理工大学研究生教育高质量发展项目资助 (gz1cx20233148)

中存在较多不能耐受大电流的电力电子设备^[6-7]。单极接地故障是最为常见的故障。为提高系统供电可靠性,柔性直流配电网多采用小电流接地方式,单极接地故障发生时,故障电流较小,极间电压不变,仍能继续传输功率^[8]。但是单极故障发生后系统不对称运行,会对系统绝缘产生极大的危害,并且由于故障特征不明显,给故障选线带来很大难度^[9-10]。

针对柔性直流配电网单极接地故障选线方法,现有研究主要有通过主动探测信号注入、基于线路边界元件以及基于故障暂态电气量等构造选线判据。考虑到单极接地故障特征不明显,故障暂态持续时间短,文献[5]和文献[10]对 MMC 进行附加控制,实现故障时探测信号的注入,基于该信号及其响应进行故障选线,该类方法增强了故障特征,但需要附加控制策略,增加了控制系统的复杂性。文献[11-12]基于线路边界元件,利用限流电抗在区内外故障下的电气特性构造故障选线判据,该类方法依赖于边界元件,局限性较大。文献[13]根据线路正负极暂态电压 Pearson 相关系数之间的差异构造故障线路识别判据,但该方法阈值整定依据仿真结果。文献[14]提出基于线路正负极两端故障电流分量余弦相似度的故障选线判据,反映两侧电流极性特征,对于高阻接地故障,理论上也能正确识别故障线路,但对通信要求较高。除此之外,为降低单极接地故障下非故障极由于故障极的耦合作用带来的影响,通过对直流线路的故障电气量进行模量分解,进而构造故障选线方法。文献[15]利用故障线路两端零模电流相关性构造故障选线判据,但该方法需要对线路两端数据进行通信。

现有单极接地故障主要以单一故障判据构造选线方法,在普通故障工况下能够准确识别故障线路,但鉴于小电流接地方式下的单极故障特征不明显、干扰因素多,单一故障判据在某些复杂故障工况下可能无法准确选线。将多种故障选线判据进行综合分析,弥补各方法的局限性,能够提高故障选线准确性^[16]。目前,对于多判据故障选线,在交流配电网已有较多研究^[17-18]。而基于直流配电网的研究较少,文献[16]针对辐射状配电网,根据各馈线首端零模电流和母线零模电压在单极接地故障下的特征,构造多故障特征融合的选线方法,但在其他拓扑结构的直流配电网中的适用性还有待研究。文献[19]以故障电流为特征量,构造 3 种选线判据进行综合判断,该方法故障特征量单一,容易受到接地电阻等因素的影响。

基于此,本文首先对单极接地故障下的零模电流、零模电压和零模功率进行特征分析,根据线路

两端零模电流相关性、零模电流与零模电压的夹角余弦以及零模功率积分绝对值大小三方面构造 3 种故障选线判据。提出利用 K-means++ 聚类算法对 3 种故障选线结果进行融合分析,可准确识别出故障线路。该方法克服了单一选线判据的局限性,无需进行选线阈值整定,耐过渡电阻和抗干扰能力强,对通信同步要求不严格。最后,在 PSCAD 进行仿真验证,验证了所提选线方法的准确性和可靠性。

1 多端柔性直流配电网拓扑与故障分析

1.1 多端柔性直流配电网系统

多端柔性直流配电网拓扑如图 1 所示, AC1 和 AC2 表示交流系统, T1 和 T2 为交流侧联接变压器,直流系统通过 MMC 换流器与交流系统相连,各直流负载、储能和光伏系统通过双有源桥型 DC/DC 换流器接入中压直流母线,交流负载则通过电压源换流器(voltage source converter, VSC)接入中压直流母线。对于系统接地,包括直流侧接地和交流侧接地,本文采用直流侧不接地,交流侧联接变压器采用 Y/Δ 联接方式,阀侧采用中性点经高阻 R_g 接地。系统采用伪双极接线方式,每条线路两端都安装有直流断路器。

1.2 线路电气量的模量分解

单极接地故障后,为消除线路耦合作用带来的影响,将正负极电气量进行模量分解^[15],解耦矩阵如式(1)和式(2)所示。规定线路电流正方向为母线流向线路,当实际电流流向与正方向相同时电流极性为正,否则为负。

$$\mathbf{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_0 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为解耦矩阵; x_p 、 x_n 分别为线路正负极电气量; x_1 、 x_0 分别为解耦所得的一模和零模量。

由式(2)可知,零模量为正负极电气量相加,当系统正常运行或者双极短路故障发生时,线路上不会出现零模分量,单极接地故障发生时才会出现零模分量。由于本文针对单极接地故障,因此选取故障电气量的零模分量进行研究,如式(3)所示。

$$\begin{cases} i_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}(i_p + i_n) \\ u_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}(u_p + u_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_0 和 u_0 分别表示线路电流和电压零模量; i_p 和

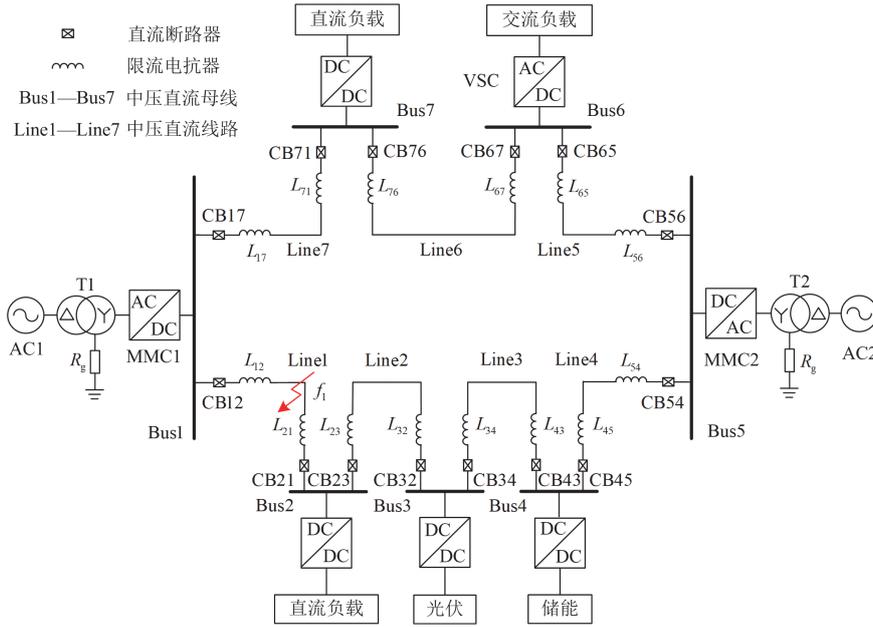


图 1 多端柔性直流配电网拓扑

Fig. 1 Multi-terminal flexible DC distribution network topology

i_n 分别表示线路正负极电流; u_p 和 u_n 分别表示线路正负极电压。

1.3 线路故障电气量零模分量特性分析

系统正常运行时, 线路电流、电压特征如图 2 所示。

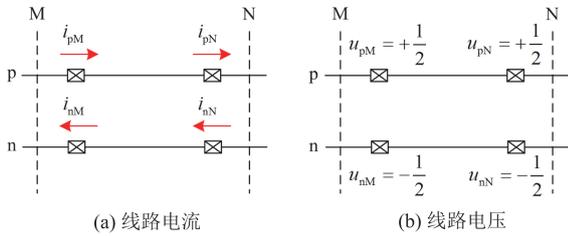


图 2 正常运行线路电流、电压特征

Fig. 2 Current and voltage characteristics of normal running lines

图 2 中: p 和 n 分别表示线路正负极; M 和 N 分别表示线路两端; i_{pM} 、 i_{pN} 和 i_{nM} 、 i_{nN} 分别表示正负极线路两端的实际电流值; u_{pM} 、 u_{pN} 和 u_{nM} 、 u_{nN} 分别表示正负极线路两端的电压大小, 电压大小用标幺值表示, 额定电压为 U_{dcN} 。

正常运行时, 正负极线路两端电流极性为一正一负, 大小相等; 正、负极电压为一正一负, 大小相等。由式(3)可得, 系统正常运行时, 线路两端零模电流、电压均为 0。

线路发生单极接地故障时, 故障点电压跌落,

可以认为在故障点附加了一个故障电源, 故障后的系统可以等效为故障前网络和故障附加网络的叠加^[20], 故障前网络较稳定, 仅分析故障附加网络。以正极接地故障为例, 电流变化特征如图 3 所示。其中: Δi_{pM} 与 Δi_{pN} 表示正极线路两端电流变化量; Δi_{nM} 与 Δi_{nN} 表示负极线路两端电流变化量。

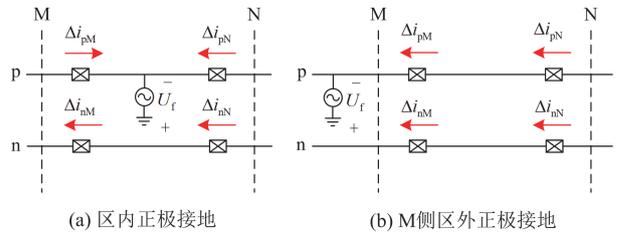


图 3 区内外正极接地故障附加网络

Fig. 3 Positive grounding fault attached network inside and outside the zone

在线路单极接地故障下, 故障极的电流变化量远大于非故障极, 因此区内外单极接地故障下线路两端电流零模分量分别如式(4)、式(5)所示。

区内正极接地:

$$\begin{cases} i_{M0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta i_{pM} + \Delta i_{nM}) > 0 \\ i_{N0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta i_{pN} + \Delta i_{nN}) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, i_{M0} 与 i_{N0} 为线路两端的电流零模分量。

M 侧区外正极接地:

$$\begin{cases} i_{M0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta i_{pM} + \Delta i_{nM}) < 0 \\ i_{N0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta i_{pN} + \Delta i_{nN}) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

系统正常运行时, 线路电流变化量较小, 线路两端电流零模分量整体变化趋势可看作无变化。以区内正极接地故障为例, 故障发生后, 线路两端电流零模分量极性为正, 电流增大, 因此两端电流零模分量呈上升趋势。M 侧区外正极接地故障下, i_{M0} 极性为负, i_{N0} 极性为正, 在故障电流增大的情况下, i_{M0} 波形呈下降趋势, i_{N0} 波形呈上升趋势。

同理, 不同故障类型线路两端电流零模分量特性如表 1 所示。

表 1 不同故障类型下线路电流零模分量特性

Table 1 Zero mode component characteristics of line

接地故障类型	i_{M0}		i_{N0}	
	极性	变化趋势	极性	变化趋势
区内正极	正	增	正	增
区内负极	负	减	负	减
区外正极	负/正	减/增	正/负	增/减
区外负极	正/负	增/减	负/正	减/增

当线路发生单极接地故障后, 正负极线路电压特性如图 4 所示。

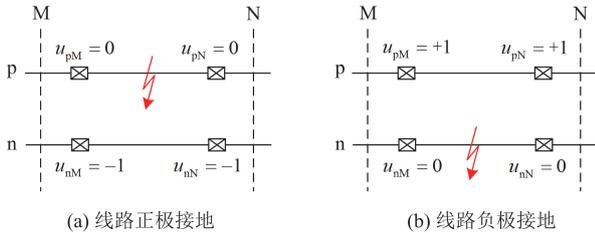


图 4 单极接地故障下正负极线路电压特征

Fig. 4 Voltage characteristics of positive and negative lines during a single-pole ground fault

根据图 2 和图 4, 可得线路在正、负极接地故障下, 其线路电压变化量和零模电压特征如表 2 所示, 其中零模电压如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_{M0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta u_{pM} + \Delta u_{nM}) \\ u_{N0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\Delta u_{pN} + \Delta u_{nN}) \end{cases} \quad (6)$$

表 2 中: Δu_{pM} 、 Δu_{pN} 和 Δu_{nM} 、 Δu_{nN} 分别为正、负极线路两端电压变化量, 由故障后电压减去故障前电压得到; u_{M0} 、 u_{N0} 为线路两端零模电压。

表 2 接地故障后线路电压特性

Table 2 Voltage characteristics of line after a ground fault

接地故障类型	Δu_{pM} 、 Δu_{pN}		Δu_{nM} 、 Δu_{nN}		u_{M0} 、 u_{N0}	
	极性	变化趋势	极性	变化趋势	极性	变化趋势
线路正极	负	减	负	减	负	减
线路负极	正	增	正	增	正	增

以上分析了线路零模电流、零模电压的故障特性, 考虑到系统采用小电流接地, 单极接地故障下, 故障电气量不明显, 对零模功率进行分析能够强化故障特征, 定义线路的零模功率如式(7)所示。

$$\begin{cases} p_{M0} = i_{M0}u_{M0} \\ p_{N0} = i_{N0}u_{N0} \end{cases} \quad (7)$$

式中, p_{M0} 、 p_{N0} 表示线路两端的零模功率。

故障发生后, 故障线路的零模电流、零模电压最大, 因此故障线路零模功率最大。

综合以上分析, 得到 3 类故障特征量: 零模电流、零模电压和零模功率。通过分析它们在故障线路和正常线路的特征差异, 进行故障识别, 其特征分析如下。

1) 在区内单极接地故障下, 线路两端 i_{M0} 与 i_{N0} 变化趋势相同, 呈正相关; 在区外单极接地故障下, 线路两端 i_{M0} 与 i_{N0} 变化趋势相反, 呈负相关。

2) 在区内单极接地故障下, 线路两端 i_{M0} 、 i_{N0} 分别与 u_{M0} 、 u_{N0} 极性和变化趋势均相反; 区外单极接地故障下, 线路两端 i_{M0} 、 i_{N0} 与 u_{M0} 、 u_{N0} 一侧极性和变化趋势相同, 一侧相反。

3) 在发生单极接地故障后, 故障线路的零模功率最大。

理论上, 以上 3 种故障特征均能识别故障线路, 但实际工程运用中故障工况影响因素复杂, 故障选线容易受到通信不同步、过渡电阻以及噪声干扰等影响。例如: 通过两端零模电流的相关性进行故障选线, 容易受到通信不同步、互感器反接等因素的影响; 根据线路各端零模电流与零模电压的极性变化差异进行选线, 基本不受通信不同步的影响, 但零模电压会受到系统控制响应速度以及接地电阻等的影响, 同时也会受到互感器反接的影响; 通过零模功率大小进行故障选线, 容易受到噪声干扰的影响, 但其可以不受互感器反接的影响。

根据单一特征进行故障选线, 存在误判情况, 甚至在某些复杂和极端工况下, 仅用其中任意两种故障特征也无法准确识别故障线路, 将 3 种故障特征进行综合判断, 可以弥补各方法存在的不足, 能够更好地适应各种复杂故障工况, 提高故障识别的可靠性和准确性。

2 多故障选线判据相关理论

在 1.3 节理论分析基础上, 基于零模电流、零模电压和零模功率在区内外接地故障的特征差异, 利用 3 种故障选线判据对多个故障特征进行量化。

2.1 Spearman 相关系数

根据线路两端零模电流相关性在区内外故障下的差异, 构造故障选线判据。

Spearman 相关系数能够反映两组变量之间的相关性, 是一种非参数统计工具^[21]。该方法将原始变量数据按照大小顺序进行排序, 根据排序位置进行计算, 如式(8)所示^[22]。

$$r = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中: r 为 Spearman 相关系数; x_n 、 y_n 分别为变量在两组变量中各自的排行; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为两组变量排行序列的平均值; N 为每组变量数据个数。

Spearman 相关系数利用排序等级进行计算, 具有不受数据量纲影响、受异常数据影响小的优点。线路两端零模电流 Spearman 相关系数 r 如表 3 所示。

表 3 Spearman 相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficient	
r	i_{M0} 与 i_{N0} 相关性
$0 < r \leq 1$	正相关
$r = 0$	不相关
$-1 \leq r < 0$	负相关

2.2 余弦相似度分析

根据线路各端零模电流与零模电压的极性和变化趋势差异, 构造故障选线判据。

通过余弦相似度比较线路零模电流与零模电压的相似程度, 能够快速、准确地反映其极性差异, 其计算如式(9)所示^[23]。

$$\cos(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^N x_n y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N y_n^2}} \quad (9)$$

式中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 、 $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ 分别为长度为 N 的两组数据; $\cos(x, y)$ 表示两组变量数据的余弦相似度大小。

余弦相似度主要体现在判别 2 个独立变量的变化趋势差异, 其相似度结果与数据大小无关。

当 $\cos(x, y) = 1$ 时, 表示两组变量变化趋势完全

相同; 当 $\cos(x, y) = 0$ 时, 表示两组变量变化趋势完全不相关; 当 $\cos(x, y) = -1$ 时, 表示两组变量变化趋势完全相反。

线路区内外故障余弦相似度特性如表 4 所示。

表 4 区内外故障线路两端余弦相似度特性

Table 4 Cosine similarity characteristics of both ends of fault lines inside and outside the zone

接地故障类型	$\cos(i_{M0}, u_{M0})$	$\cos(i_{N0}, u_{N0})$
区内接地	< 0	< 0
区外接地	$> 0 / < 0$	$< 0 / > 0$

定义线路余弦相似度比值 C , 如式(10)所示。

$$C = \frac{\cos(i_{M0}, u_{M0})}{\cos(i_{N0}, u_{N0})} \quad (10)$$

当发生区内故障时, 线路两端计算所得余弦相似度同号, 其比值 C 为正; 当发生区外故障时, 线路两端计算所得余弦相似度异号, 其比值 C 为负。

2.3 零模功率积分选线

理论上故障线路零模功率最大, 由此特征构造故障选线判据。

为充分利用故障分量信息, 提高抗干扰能力, 对零模功率积分, 定义一个表征功率能量的参量 $E_{K0}(t)$, $K = M, N$, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} E_{M0}(t) = \int_0^t p_{M0}(\tau) d\tau \\ E_{N0}(t) = \int_0^t p_{N0}(\tau) d\tau \end{cases} \quad (11)$$

提出一种零模功率积分选线判据, 通过比较各条线路两端的零模功率积分值的绝对值之和 $E_0(t)$, 如式(12)所示, 最大者即判定其为故障线路。

$$E_0(t) = |E_{M0}(t)| + |E_{N0}(t)| \quad (12)$$

3 K-means++ 聚类算法单极故障选线方案

本文以 K-means++ 聚类算法融合 3 种选线判据结果, 通过聚类分析得到故障选线结果, 实现各判据的优势互补, 并且无需对每一种选线判据进行选线阈值确定, 避免了因阈值选定不合理或者在复杂工况下根据阈值选线存在误判的可能, 提高了故障选线的准确性以及对于复杂故障工况的适应性。

3.1 故障启动判据

单极接地故障发生后, 线路零模电压发生突变, 将零模电压变化率作为故障启动判据, 可以实现保护的快速启动^[8], 如式(13)所示。

$$\left| \frac{du_{K0}}{dt} \right| > U_{0set} \quad (13)$$

式中, U_{0set} 为启动判据阈值, 以躲过系统正常运行时的最大不平衡电压变化率进行整定, 本文阈值设

为 100 kV/s。

3.2 故障选极判据

根据图 4 可知，线路不同极接地，其电压变化特征差异明显，由此构造故障选极判据，如式(14)所示^[13]。

$$D_k = \begin{cases} 1 & du_p/dt < 0 \cap du_n/dt < 0, \text{ 正极故障} \\ -1 & du_p/dt > 0 \cap du_n/dt > 0, \text{ 负极故障} \end{cases} \quad (14)$$

3.3 K-means++ 聚类算法

K-means 聚类可以理解为对一堆数据点进行分析，最后聚类结果保证同一类的数据点都足够近，而不在同一类的数据点都足够远^[24]。本文将各条线路 3 种选线判据结果作为聚类输入数据的三维特征，通过聚类分析，理论上故障线路属于离群点，可以高效、准确地筛选出故障线路。但 K-means 聚类效果对初始值的选取较为敏感，如簇的个数 k 、初始聚类中心点的选取。

而 K-means++ 聚类算法，其在初始聚类中心的选择上进行了优化，使得初始聚类中心之间的距离尽可能大，从而得到更稳定、更合理的聚类结果。由于本文数据集分为两类，故障线路簇和非故障线路簇，因此 k 值确定为 2。具体步骤如下^[25]：

1) 随机选择一个点作为初始聚类中心 c_1 ；

2) 对剩余数据点，计算其与该初始聚类中心的欧式距离，选择距离最远的一个点作为另一个初始聚类中心 c_2 ；

3) 计算数据集中各个点与两个初始聚类中心的欧式距离，根据欧式距离最小原则，将所有点分配给距离其最近的聚类中心；

4) 根据分配结果，计算每一簇所有点的平均值，更新每一簇的聚类中心；

5) 重复步骤 3) 和步骤 4)，直达到最大迭代次数或者各个簇的聚类中心不再变化。

3.4 K-means++ 聚类算法选线判据融合

将 3 种故障选线判据结果分别作为数据点的 x 、 y 、 z 轴坐标值，将每一条线路的 3 种选线结果构造成为三维空间的一个点。各点的 x 轴坐标值为该线路两端 i_{M0} 与 i_{N0} 的 Spearman 相关系数 r ，其值范围为 $[-1,1]$ ，如式(15)所示；各点的 y 轴坐标值与该线路两端 i_{M0} 、 i_{N0} 分别与 u_{M0} 、 u_{N0} 计算所得余弦相似度比值 C 有关，如式(16)所示；各点的 z 轴坐标值与该线路两端的零模功率积分的绝对值求和值 $E_0(t)$ 有关，对该值进行归一化处理，如式(17)所示。

$$x_i = r_i \quad (15)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & C_i > 0 \\ -1 & C_i < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$z_i = \frac{E_{i0}(t) - E_0(t)_{\min}}{E_0(t)_{\max} - E_0(t)_{\min}} \quad (17)$$

式中：下标“ i ”表示第 i 条线路； $E_0(t)_{\min}$ 和 $E_0(t)_{\max}$ 分别为各线路计算所得的 $E_0(t)$ 的最小值和最大值。

本文单极接地故障具体选线流程如图 5 所示。

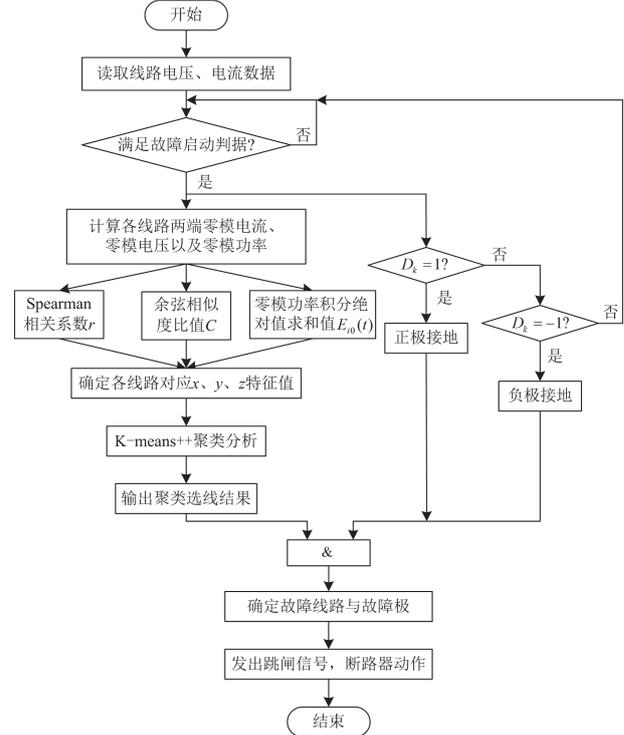


图 5 单极接地故障选线流程图

Fig. 5 Flowchart of line selection for single-pole grounding fault

4 仿真分析

在 PSCAD 搭建如图 1 所示的多端柔性直流配电网，系统采用主从控制，MMC1 采用定直流电压控制，MMC2 采用定有功功率控制，参数如表 5 所示，采样频率为 20 kHz。

表 5 系统仿真参数

参数	数值
额定直流电压/kV	±10
MMC1 电压/kV	±10
MMC2 功率/MW	10
子模块电容/μF	6000
桥臂电感/mH	8
桥臂子模块数量/个	20
直流电抗器/mH	15
线路电阻/(Ω/km)	0.03
线路电感/(mH/km)	0.56

4.1 选线方案验证

Line1 在 1.5 s 时发生正极接地故障, 过渡电阻为 0Ω , 图 6 给出了故障线路与非故障线路的零模电流、零模电压以及零模功率的特征差异, 其中非故障线路以 Line2 为例, 可以看出其故障特征与 1.3 节理论分析一致。

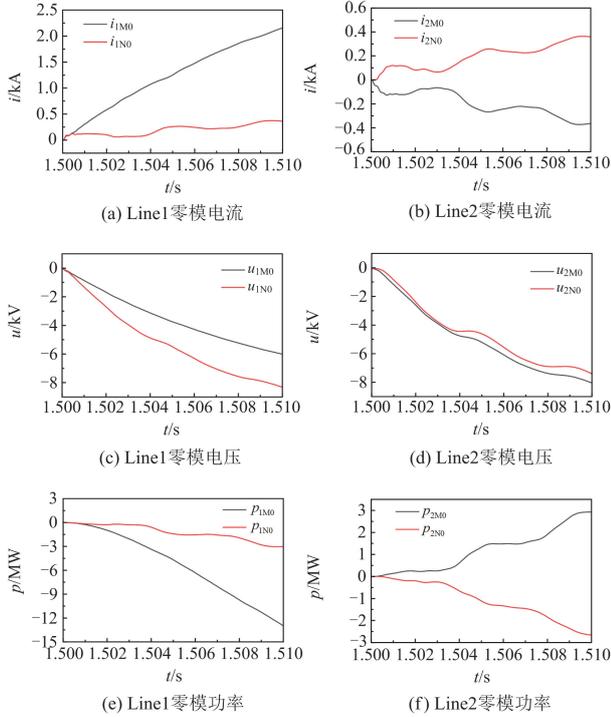


图 6 Line1 发生正极接地故障时 Line1 与 Line2 的故障特征仿真图

Fig. 6 Fault feature simulation diagram of Line1 and Line2 when positive grounding a fault occurs on Line1

故障发生后 Line1 的零模电压变化率如图 7 所示, 可以看出, 零模电压变化率在故障后第 1 个采样点, 即 0.05 ms 超过保护启动阈值。为避免雷击等干扰, 启动判据持续成立 0.3 ms , 即可判定故障

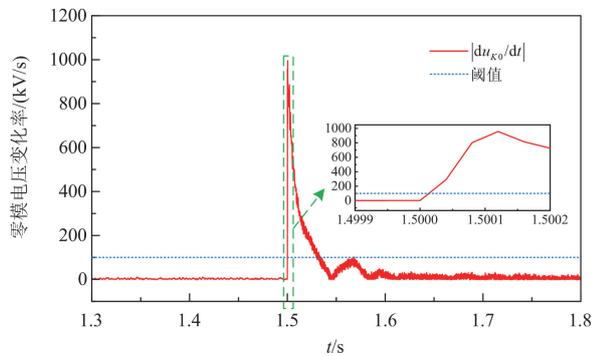


图 7 Line1 零模电压变化率

Fig. 7 Line1 zero mode voltage change rate

发生, 保护启动。然后提取 40 个采样点, 即 2 ms 的数据, 进行故障选线。

根据故障后的电流变化量和电压变化量, 按照 3 种故障选线判据进行分析处理。

1) 零模电流 Spearman 相关系数

表 6 为各线路两端零模电流 Spearman 相关系数值。由表 6 可知, Line1 两端零模电流 Spearman 相关系数为正, 其余线路均为负。

表 6 线路 Spearman 相关系数

Table 6 Spearman correlation coefficient of lines

故障选	线路						
线判据	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7
r	0.933	-0.964	-0.929	-0.975	-0.953	-0.931	-0.999
x	0.933	-0.964	-0.929	-0.975	-0.953	-0.931	-0.999

2) 余弦相似度比值

表 7 为各线路两端零模电流分别与零模电压计算所得余弦相似度比值 C 。

表 7 线路余弦相似度比值

Table 7 Line cosine similarity ratio

故障选	线路						
线判据	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7
C	1.050	-0.994	-0.988	-0.990	-1.004	-0.976	-1.001
y	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

由表 7 可知, Line1 两端计算所得余弦相似度比值 C 为正, 其余线路均为负。

3) 零模功率积分

表 8 为各线路两端零模功率积分后绝对值求和结果。由表 8 可知, Line1 计算所得零模功率积分后绝对值求和结果远大于其他线路求和结果。

表 8 线路零模功率积分后绝对值求和

Table 8 Absolute value sum of line zero-mode power after integration

故障选	线路						
线判据	Line1	Line2	Line3	Line4	Line5	Line6	Line7
E_0	0.037	0.012	0.011	0.01	0.008	0.006	0.019
z	1.000	0.194	0.161	0.129	0.065	0.000	0.419

将表 6—表 8 中计算结果 x 、 y 、 z 作为各线路在 K-means++ 聚类分析中的三维特征输入值, 分析结果如图 8 所示。

聚类算法对各线路 3 种选线判据结果构成的三维特征输入数据集进行聚类分析, 得出的聚类标签为 [1 2 2 2 2 2], 表示 Line1 与其他线路不属于同一类, 可以判定 Line1 发生了故障。

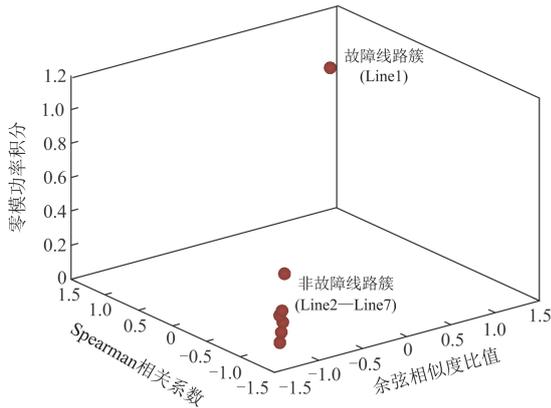


图 8 普通工况下 K-means++多判据故障选线
Fig. 8 K-means++ multi-criterion fault line selection under normal working conditions

其他线路发生接地故障后选线结果如表 9 所示。

表 9 普通工况下 K-means++多判据故障选线结果

Table 9 K-means++ multi-criterion fault line selection results under normal working conditions

故障位置	聚类标签	选线结果
Line2	[2 1 2 2 2 2]	Line2
Line4	[2 2 2 1 2 2]	Line4
Line6	[2 2 2 2 2 1]	Line6

4.2 保护方案性能分析

4.2.1 过渡电阻的影响

本文以 Line1 为例，经不同过渡电阻进行仿真分析，验证选线方案的可靠性。

Line1 经 100 Ω、300 Ω 和 500 Ω 过渡电阻发生正极接地故障，经过 3 种故障选线判据，得到各判据计算结果如表 10 所示。Line1 经 100 Ω、300 Ω 过渡电阻接地各判据都能正确选线，但在经 500 Ω 过渡电阻发生接地故障时，其中对于零模电流 Spearman 相关性选线，Line1、Line5 和 Line6 计算结果为正，其余线路计算结果为负，可见仅通过零

表 10 不同过渡电阻下的 3 种故障选线判据结果

Table 10 Results of three fault line selection criteria with different transition resistances

线路	过渡电阻								
	100 Ω			300 Ω			500 Ω		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Line1	0.82	1	1.00	0.78	1	1.00	0.78	1	1.00
Line2	-1.00	-1	0.52	-0.95	-1	0.44	-0.86	-1	0.54
Line3	-0.95	-1	0.07	-0.61	-1	0.01	-0.96	-1	0.08
Line4	-0.39	-1	0.01	-0.64	-1	0.01	-0.89	-1	0.00
Line5	-0.79	-1	0.00	-1.00	-1	0.00	0.05	-1	0.09
Line6	-0.81	-1	0.07	-0.90	-1	0.05	0.19	-1	0.09
Line7	-0.76	-1	0.44	-0.54	-1	0.34	-0.62	-1	0.46

模电流进行故障选线，在过渡电阻为 500 Ω 时无法准确判断故障线路。

通过 K-means++ 对 3 种选线结果进行融合分析，结果如图 9 和表 11 所示。可得线路在经较高过渡电阻接地故障后，对于单一故障选线判据可能无法准确选出故障线路，但通过 K-means++ 对 3 种故障选线结果进行融合判断，仍能可靠选出故障线路。

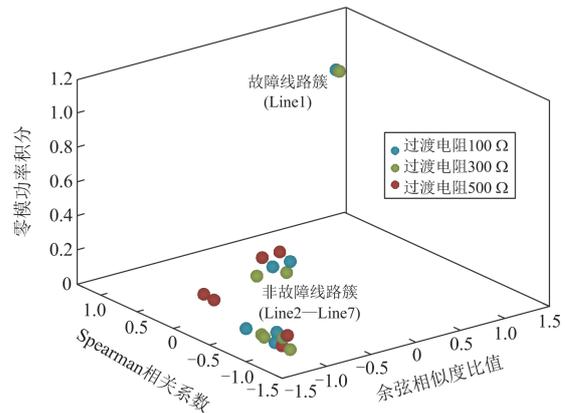


图 9 不同过渡电阻下 K-means++多判据故障选线

Fig. 9 K-means++ multi-criterion fault line selection with different transition resistances

表 11 不同过渡电阻下 K-means++多判据故障选线结果

Table 11 K-means++ multi-criterion fault line selection results with different transition resistances

故障位置/过渡电阻	聚类标签	选线结果
Line1/100 Ω	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1/300 Ω	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1/500 Ω	[1 2 2 2 2 2]	Line1

4.2.2 信号噪声的影响

在实际工程中，采样信号容易受到噪声干扰，因此对线路电流、电压采样信号叠加不同信噪比的噪声，针对噪声对选线方案的影响进行了仿真分析。

以 Line1 发生正极接地故障为例，故障信号分别叠加 1 dB、3 dB 和 5 dB 的噪声，经过 3 种故障选线判据，得到各判据计算结果如表 12 所示。故障信号叠加 3 dB 和 5 dB 的噪声时，各选线判据均能正确选线。但故障信号叠加信噪比为 1 dB 的噪声时，其对于零模功率积分选线，Line2 计算结果为最大，因此仅根据该单一选线判据无法正确选线。

通过 K-means++ 对 3 种选线结果进行融合分析，结果如图 10 和表 13 所示。即使故障信号叠加了较大的噪声干扰，某单一选线判据无法正确选线，但通过 K-means++ 对 3 种故障选线结果进行融合判断，仍能可靠选出故障线路。

表 12 不同信噪比下的 3 种故障选线判据结果

Table 12 Results of three fault line selection criteria with different SNR single-to-noise ratios

线路	信噪比								
	1 dB			3 dB			5 dB		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Line1	0.61	1	0.89	0.69	1	1.00	0.68	1	1.00
Line2	-0.62	-1	1.00	-0.75	-1	0.57	-0.65	-1	0.52
Line3	-0.85	-1	0.16	-0.87	-1	0.27	-0.86	-1	0.22
Line4	-0.63	-1	0.07	-0.75	-1	0.04	-0.78	-1	0.07
Line5	-0.03	-1	0.00	-0.01	-1	0.00	-0.15	-1	0.00
Line6	-0.22	-1	0.02	-0.04	-1	0.02	-0.09	-1	0.02
Line7	-0.80	-1	0.28	-0.86	-1	0.38	-0.91	-1	0.29

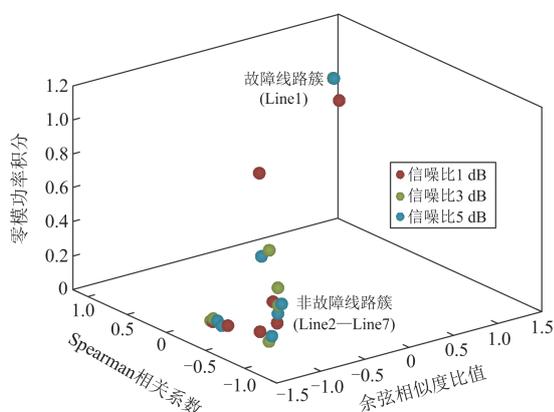


图 10 不同信噪比下 K-means++ 多判据故障选线

Fig. 10 K-means++ multi-criterion fault line selection with different signal-to-noise ratios

表 13 不同信噪比下 K-means++ 多判据故障选线结果

Table 13 K-means++ multi-criterion fault line selection results with different signal-to-noise ratios

故障位置/信噪比	聚类标签	选线结果
Line1/1 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1/3 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1/5 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1

4.2.3 复杂工况的影响

为验证复杂工况对保护方案的影响, 以 Line1 发生正极接地故障为例, 过渡电阻为 500Ω , 对采样信号叠加信噪比为 1 dB 的噪声, 同时考虑最大通信延时 0.3 ms ^[16], 依次设定不同的通信延时, 采用 3 种选线判据所得结果如表 14 所示。可以看出, 依靠两端零模电流相关性和基于零模功率积分值两种判据, 在该复杂工况下都会发生误判, 无法准确选出故障线路, 而通过零模电流和零模电压余弦相似度选线判据可以准确识别故障线路。

通过 K-means++ 对 3 种选线判据计算结果进行融合分析, 结果如图 11 和表 15 所示。说明在故障经高阻接地, 同时采样信号叠加强噪声, 并且考虑不同通信延时的复杂工况下, 虽然存在两个选线判据都无法准确选线, 但通过对 3 种选线判据计算结果进行融合分析, 仍可以准确识别出故障线路。

表 14 不同复杂工况下的 3 种故障选线判据结果

Table 14 Results of three fault line selection criteria under different complex working conditions

线路	复杂工况								
	0.1 ms/500 Ω /1 dB			0.2 ms/500 Ω /1 dB			0.3 ms/500 Ω /1 dB		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
Line1	0.47	1	0.97	0.44	1	0.95	0.42	1	0.95
Line2	-0.47	-1	0.60	-0.48	-1	0.59	-0.43	-1	0.64
Line3	-0.23	-1	0.07	-0.19	-1	0.06	-0.17	-1	0.04
Line4	-0.17	-1	0.00	-0.11	-1	0.00	-0.12	-1	0.00
Line5	0.02	-1	0.15	-0.02	-1	0.14	0.01	-1	0.15
Line6	-0.05	-1	0.21	0.04	-1	0.20	0.07	-1	0.20
Line7	-0.58	-1	1.00	-0.56	-1	1.00	-0.57	-1	1.00

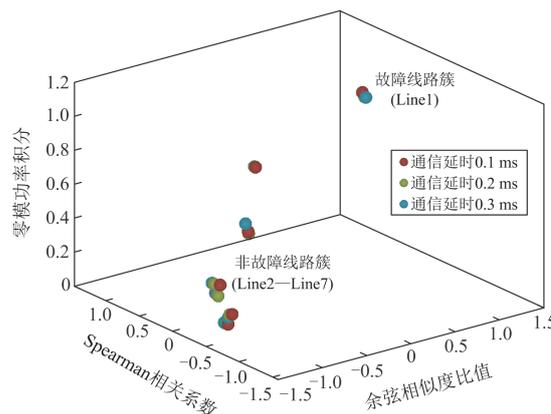


图 11 不同复杂工况下 K-means++ 多判据故障选线

Fig. 11 K-means++ multi-criterion fault line selection under different complex working conditions

表 15 不同复杂工况下 K-means++ 多判据故障选线结果

Table 15 K-means++ multi-criterion fault line selection results under different complex working conditions

故障位置	复杂工况	聚类标签	选线结果
Line1	0.1 ms/500 Ω /1 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1	0.2 ms/500 Ω /1 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1
Line1	0.3 ms/500 Ω /1 dB	[1 2 2 2 2 2]	Line1

在其他复杂故障工况下, 如互感器反接的极端情况下, 依靠极性的方法无法正确判断故障线路; 在系统控制未及时响应的情况下, 依靠电压变化的方法也容易出现误判。而通过本文方法, 仍可以准确

地识别出故障线路, 由于篇幅原因, 这里不再赘述。

5 结论

通过分析多端柔性直流配电网单极接地故障后的电气量特征, 基于零模电流、零模电压以及零模功率 3 种特征量, 提出一种基于 K-means++ 多判据融合故障选线方法, 结论如下。

1) 通过分析正常线路与故障线路的电气量特征, 得到在线路两端零模电流相关性、线路各端零模电流与零模电压极性变化相关性以及线路零模功率绝对值大小三方面的差异性。

2) 利用 K-means++ 对线路两端零模电流 Spearman 相关系数、线路两端零模电流与零模电压余弦相似度比值以及线路两端零模功率积分后绝对值求和 3 种选线判据结果进行融合判断, 能够准确可靠地选择出故障线路。

3) 所提方法避免了单一选线方法的阈值整定问题, 仿真结果表明, 该方法耐过渡电阻、噪声干扰以及通信延时能力强, 克服了单一选线判据在高阻接地、强干扰等环境下无法正确选线的局限性, 提高了直流配电网单极接地故障选线结果的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] HE Bangbang, CHEN Wu, RUAN Xinbo, et al. A generic small-signal stability criterion of DC distribution power system: bus node impedance criterion (BNIC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 6116-6131.
- [2] 刘宗焯, 于弘洋, 周丁, 等. 适用于直流配电网故障选线的电力电子变压器分步闭锁方案[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 618-627.
- LIU Zongye, YU Hongyang, ZHOU Ding, et al. Step locking scheme of power electronic transformer for DC distribution network fault line selection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 618-627.
- [3] 梁栋, 邱馨洁, 刘琪, 等. 电动汽车与直流配电网协同的分布式自适应滚动预测调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 90-99.
- LIANG Dong, QIU Xinjie, LIU Qi, et al. Distributed adaptive rolling predictive scheduling based on coordination of electric vehicles and DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24): 90-99.
- [4] 陈新岗, 张金京, 马志鹏, 等. 基于 MMC 的光伏直流升压并网系统故障分析及限流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 145-154.
- CHEN Xingang, ZHANG Jinjing, MA Zhipeng, et al. MMC-based fault analysis and current-limiting control strategy for a photovoltaic DC boost grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 145-154.
- [5] 刘子奕, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 21-30.
- LIU Ziyi, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. An active converter injection-based fault location method for a flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 21-30.
- [6] 高淑萍, 左俊杰, 宋国兵, 等. 基于电流故障分量变化特征的三端柔性直流配电网线路保护方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 139-148.
- GAO Shuping, ZUO Junjie, SONG Guobing, et al. Line protection method for three terminal flexible DC distribution network based on variation characteristics of current fault components[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(8): 139-148.
- [7] 王晓卫, 田影, 高杰, 等. 基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配电网故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 1-15.
- WANG Xiaowei, TIAN Ying, GAO Jie, et al. A DC distribution network fault detection method based on bump fluctuation at a dense inflection point[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 1-15.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于限流电抗电压积分值的环状柔性直流配电网保护方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 104-116.
- DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 104-116.
- [12] 韦廷方, 王志杰, 王鹏, 等. 基于限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5068-5079.
- WEI Yanfang, WANG Zhijie, WANG Peng, et al. Protection method for flexible DC distribution network faults based on current limiting reactance voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5068-5079.

- [13] 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.
- [14] 戴志辉, 刘雪燕, 刘自强, 等. 基于电流故障分量的柔直配电网线路纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1684-1695.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1695.
- [15] 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.
- [16] 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]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(6): 23-33.
TIAN Yang, WANG Xiaowei, LIU Weibo, et al. Single-pole fault feeder selection method for DC distribution network based on multi-fault feature fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(6): 23-33.
- [17] 王建元, 张宇辉, 刘铖. 基于参数优化 VMD 和改进 K 聚类判据融合的配电网故障选线方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7): 135-145.
WANG Jianyuan, ZHANG Yuhui, LIU Cheng. Fault line selection method of distribution network based on the fusion of parameter optimized variational modal decomposition and improved K clustering criterion[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 135-145.
- [18] 邵翔, 郭谋发, 游林旭. 基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 63-71, 78.
SHAO Xiang, GUO Mofa, YOU Linxu. Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 63-71, 78.
- [19] 张伟, 方永丽, 孙硕, 等. 基于多重综合判据的单端 MMC 直流配电网单极接地保护方法[J]. 广东电力, 2022, 35(5): 53-59.
ZHANG Wei, FANG Yongli, SUN Shuo, et al. Single pole grounding protection method for single-ended MMC DC distribution network based on multiple comprehensive criteria[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 53-59.
- [20] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流配电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171.
- [21] 陈新岗, 邹越越, 朱莹月, 等. 一种采用 Spearman 相关系数与电流积分比率配合的直流配电网纵联保护方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 172-180.
CHEN Xinggang, ZOU Yueyue, ZHU Yingyue, et al. A pilot protection method of DC distribution network based on coordination of spearman correlation coefficient and current integration ratio[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 172-180.
- [22] 于群, 霍筱东, 何剑, 等. 基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5372-5381.
YU Qun, HUO Xiaodong, HE Jian, et al. Trend prediction of power blackout accidents in chinese power grid based on Spearman's correlation coefficient and system inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5372-5381.
- [23] 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网线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
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): 3823-3832.
- [24] 王远川, 李泽文, 夏翊翔, 等. 基于 VMD 和改进聚类算法的配电网故障选线方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(4): 9-18.
WANG Yuanchuan, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Fault line selection method of distribution network based on VMD and improved clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(4): 9-18.
- [25] 龙梦翔, 付桂翠, 万博, 等. 基于 K-means++ 聚类算法和 SSIM 指标的金属板材腐蚀区域识别[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(2): 437-444.
LONG Mengxiang, FU Guicui, WAN Bo, et al. Corrosion area identification of sheet metal based on K-means++ clustering algorithm and SSIM index[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2024, 44(2): 437-444.

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-10-09

作者简介:

陈新岗(1968—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电气设备状态监测、智能发变电运行与控制、信号采集与信号处理; E-mail: chenxingang@cqut.edu.cn

曾慧敏(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流配电网的保护与控制; E-mail: 2846842379@qq.com

马志鹏(1988—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。E-mail: mazhipeng@cqut.edu.cn

(编辑 魏小丽)