

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221965

基于 Pearson 相关系数与广义 S 变换的低压 直流微电网的故障选线方法

高淑萍^{1,2}, 李晓芳^{1,2}, 宋国兵³, 郑瀚^{1,2}, 郭芳宾^{1,2}

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市电气设备状态监测与供电安全重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对低压直流微电网线路的故障选线方法的研究有限, 提出一种基于 Pearson 相关系数与广义 S 变换的故障选线方法。首先, 介绍了低压直流微电网的一般组成。在此基础上, 研究了低压直流微电网的单极故障以及极间故障的故障特征, 提出选线方法, 对各线路正负极首末端电流差进行 Pearson 相关系数计算来确定故障线路。然后对所选故障线路正负线路首端的电流量进行广义 S 变换, 计算出其能量和的比值判别故障极性或者极间故障。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建出低压直流微电网模型以输出各线路电流数据, 并利用 Matlab 对数据进行仿真。结果表明, 所提选线方法直接有效, 且耐受过渡电阻的能力较强。

关键词: 低压直流微电网; 广义 S 变换; Pearson 相关系数; 单极故障; 故障选线

Fault line selection method of a low-voltage DC microgrid based on the Pearson correlation coefficient generalized S-transform

GAO Shuping^{1,2}, LI Xiaofang^{1,2}, SONG Guobing³, ZHENG Han^{1,2}, GUO Fangbin^{1,2}

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: There is limited research on fault line selection methods for low-voltage DC microgrid lines. Thus this paper proposes a fault line selection method based on the Pearson correlation coefficient and generalized S transform. First, the general composition of a low-voltage DC microgrid is introduced. Then the fault characteristics of unipolar and inter-pole faults of low-voltage DC microgrids are studied, and a line selection method is proposed. The Pearson correlation coefficient calculation is performed on the current difference between the first and last ends of two polarities of each line to determine the fault line. Then it does generalized S transform on the current at the head of the positive and negative lines of the selected fault line, and the ratio of energy sum is calculated to identify fault polarity or inter-pole fault. Finally, a low-voltage DC microgrid model is built in PSCAD/EMTDC to output the current data of each line, and then Matlab is used to simulate the data. The results show that the line selection method proposed is direct and effective, and the ability to withstand transition resistance is strong.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777166).

Key words: low voltage DC microgrid; generalized S transform; Pearson correlation coefficient; single-pole fault; fault line selection

0 引言

我国“十四五”规划将发展新能源作为重点研

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777166); 国家自然科学基金国际合作与交流项目资助(52061635105); 国家电网有限公司总部科技项目资助(520940200060)

究项目, 政策性扶持光伏、风电、电动汽车等新能源行业, 推进我国能源结构持续向绿色低碳方向发展^[1-4]。为了进一步调整能源结构, 电力系统的智能化发展也加快了进程^[5-6]。直流微电网作为电力系统智能化发展的重点方向, 一般由风电机组、储能、光伏和交直流负荷等分布式单元组成^[7-10]。相较于传统交流电网, 直流微电网具有更强的灵活性和可

控性, 可短时间传输电能, 满足短距离用电需求; 由于一般中低压直流微电网线路较短且多, 且故障后故障电流较小, 不影响负荷连续供电, 系统可继续工作 1~2 h, 故不必立即跳闸, 但实际仍须查找故障线路并尽快切除, 以避免进一步损坏设备, 但故障电流幅值较小, 给故障选线增加了不少难度^[11-14]。同时由于地下电缆的大量应用, 确定停电范围、快速准确选择并切断故障线路对于提高直流微电网安全可靠运行具有重要意义^[15]。

文献[16]以母线不平衡电压为判据, 通过各线路正负极电流差值识别故障线路与故障极, 但是仅限于单极故障。文献[17]提出的配电网单相故障选线方法, 基于 S 变换相关度和深度学习理论, 利用 S 变换得到二位相关度图像, 通过卷积神经网络深度学习模型, 实现故障线路的精确识别。文献[18]提出的柔性直流电网故障识别方案是以低压作为判据, 通过限流电抗器上的电压变化率和极性确定故障区间, 通过零模故障分量确定故障极。文献[19]提出了一种基于小波分辨率分析和机器学习的直流微电网故障检测和定位方法, 该方法利用多分辨率分析与离散小波变换来计算直流故障电流的高频分量并确定高频范围, 采用支持向量机作为用于故障类型分类的分类器, 采用高斯过程作为回归工具用于估计故障位置。在配电网的故障选线方面, 关于行波全景波形的研究也有相关应用^[20], 行波全景波形类似于 S 变化, 同样具有较为丰富的时间-频率-幅值时频域故障信息, 通过计算各条线路的相关系数之和, 能实现配电网在高阻抗接地情况下的故障选线。

现有文献虽然针对配电网提出一些故障选线方法, 但是针对低压直流微电网的故障选线方法比较少, 仍然需要进一步探索研究。

本文在分析低压直流微电网的组成及研究其故障特征的基础上, 提出一种基于 Pearson 相关系数和广义 S 变换的故障选线方法, 能够同时适用于单极故障和极间故障情况, 利用线路两端电流的相关性作为故障判据确定故障线路, 再根据广义 S 变换后故障线路正负极的能量和之比确定故障极, 一定程度上解决了频域故障检测方法计算量大的问题。最后, 通过 PSCAD 建立 400 V 低压直流微电网模型仿真实验, 验证了本文所提选线方法的可靠性, 对于直流微电网的相关研究具有参考价值。

1 低压直流微电网的组成

一般常见的辐射状低压直流微电网的拓扑图如图 1 所示, 该系统包括储能装置、风电机组、交流负荷、直流负荷、光伏阵列以及变流器等。通过变流

器连接 10 kV 交流电网。直流母线上电压为±400 V。双极性直流微电网一般存在 4 种故障类型: 正极接地(positive phase ground, PPG)、负极接地(negative phase ground, NPG)、极间短路(phase-to-phase, PP)、断线故障(disconnection fault, DF)。在实际应用中, 出于环境因素、物理损坏和电缆退化等影响, PPG、NPG、PP 较为常见, 故本文主要研究这 3 种故障。

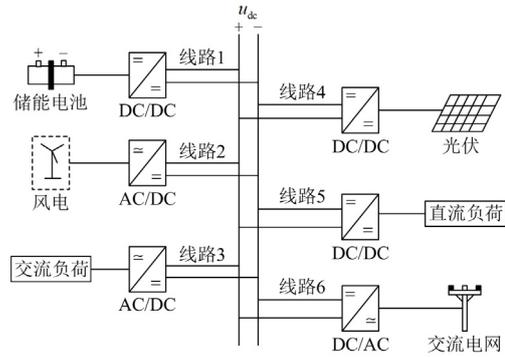


图 1 低压直流微电网拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of low-voltage DC microgrid

2 直流微电网单极故障特征

2.1 单极故障特征分析

以图 1 模型线路 1 正极发生接地故障为例进行分析, 故障发生时电容电流以及各线路负荷电流分布如图 2 所示。

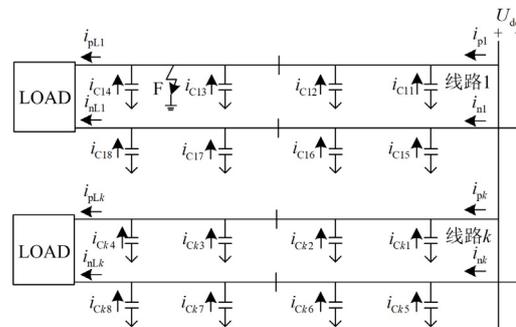


图 2 单极故障电流分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of unipolar fault current distribution

图 2 中, i_{p1}/i_{n1} 、 i_{pk}/i_{nk} 为故障与非故障线路首端的正负极电流, i_{pL1}/i_{nL1} 、 i_{nLk}/i_{pLk} 分别为故障线路与非故障线路正负极负荷电流。设置线路 1 正极故障, 正负极线路分布电容均需要放电, 电容电流会由线路流向接地点, 规定电流正方向为从母线流向线路, 根据基尔霍夫电流定律, 可得故障 F 处的电流为

$$i_F = \sum_{k=2}^5 \sum_{d=1}^8 i_{Ckd} + \sum_{d=1}^8 i_{C1d} \quad (1)$$

式中： i_F 为线路 1 流向故障点的电流； i_{C1d} 、 i_{Ckd} 为故障线路与非故障线路正负极对地电容电流， $d=0,1,\dots,8$ 。定义非故障线路正负极首末端电流差分别为 Δi_{pk} 与 Δi_{nk} 。

$$\Delta i_{pk} = i_{pk} - i_{pLk} = -\sum_{d=1}^4 i_{Ckd} \quad (2)$$

$$\Delta i_{nk} = i_{nk} - i_{nLk} = -\sum_{d=5}^8 i_{Ckd} \quad (3)$$

由于线路参数一致， $-\sum_{d=1}^4 i_{Ckd} = -\sum_{d=5}^8 i_{Ckd}$ 。定义故障线路正负极首末端电流差分别为 Δi_{p1} 与 Δi_{n1} 。

$$\Delta i_{p1} = i_{p1} - i_{pL1} = i_F - \sum_{d=1}^4 i_{C1d} = \sum_{k=2}^5 \sum_{d=1}^8 i_{Ckd} + \sum_{d=5}^8 i_{C1d} \quad (4)$$

$$\Delta i_{n1} = i_{n1} - i_{nL1} = -\sum_{d=5}^8 i_{C1d} \quad (5)$$

综上所述，某一线路发生单极故障时，非故障线路正负极首末端电流差大小相等，方向相同；故障线路故障极首末端电流差远大于非故障极，可依此识别故障线路。

2.2 极间故障特征分析

以图 1 模型线路 1 发生极间故障为例进行分析，故障发生时电容电流以及各线路负荷电流分布如图 3 所示。

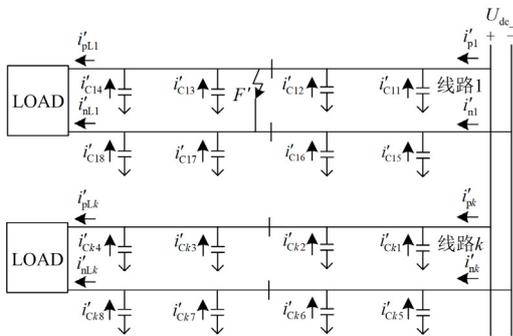


图 3 极间故障电流分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the fault current distribution between the poles

图 3 中， i'_{p1}/i'_{n1} 、 i'_{pk}/i'_{nk} 为故障与非故障线路首端的正负极电流， i'_{pL1}/i'_{nL1} 、 i'_{pLk}/i'_{nLk} 分别为故障线路与非故障线路正负极负荷电流。设置线路 1 极间故障，正负极线路分布电容均需要放电，电容电流会由线路流向极间故障点 F' ，规定电流正方向为从母线流向线路，与单极故障分析类似，非故障线路正负极首末端电流差 $\Delta i'_{pk}$ 与 $\Delta i'_{nk}$ 结论相同；对于故障线路正负极首末端电流差，有

$$\Delta i'_{p1} = i'_{p1} - i'_{pL1} = i'_F - \sum_{d=1}^4 i'_{C1d} \quad (6)$$

$$\Delta i'_{n1} = i'_{n1} - i'_{nL1} = -i'_F - \sum_{d=5}^8 i'_{C1d} \quad (7)$$

综上所述，某一线路发生极间故障时，非故障线路正负极首末端电流差方向相同，大小相等；故障线路正负极首末端电流差方向相反，大小相差 $\sum_{d=1}^8 i'_{C1d}$ ，可依此识别极间故障线路。

3 基于广义 S 变换的故障选线方法

3.1 特征频段的选取

由上述分析可知，通过电流差可以识别故障线路，但作为一种连续频谱信号，电流差即电流突变量在高频部分会因幅频特性在达到谐振峰值后在线路上发生衰减，而低频部分又易受到负载式电流和分布式电源的影响。因此，下面对电流信号的幅频特性进行分析，从而提取有效特征频段的电流差。将线路用 Π 型电路进行等效，分析线路的频率特性^[21]，以正极线路为例进行分析，根据二端口网络方程，可得线路首末端电流相量传递函数为

$$G(s) = \frac{2}{CLI^2s^2 + CRl^2s + 2} \quad (8)$$

式中： s 为拉普拉斯算子； R 、 L 、 C 分别为线路单位长度电阻、电感、电容，单位分别为 Ω 、 H 、 F ； l 为线路长度，单位为 km 。

通过化简，振荡环节的传递函数可以表示为

$$G(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\sqrt{\frac{2}{CLI^2}}}\right)^2 + 2(Rl\sqrt{\frac{C}{8L}})\left(\frac{s}{\sqrt{\frac{2}{CLI^2}}}\right) + 1} \quad (9)$$

根据本文模型线路参数，用 Matlab 画出线路传递函数 $G(s)$ 的幅频特性曲线，如图 4 所示。

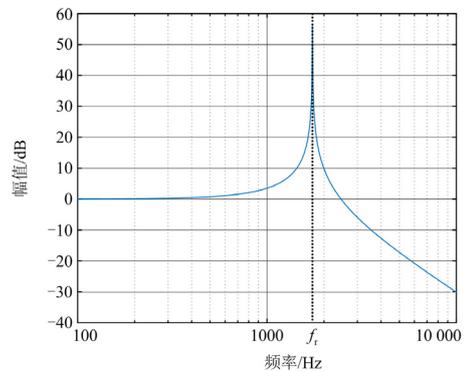


图 4 线路传递函数的幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curve of the line transfer function

图 4 中对应的谐振频率为 $f_r = 1740 \text{ Hz}$, $f < f_r$, 传递函数的幅频特性由 0 平缓后逐渐增大, $f = f_r$, 幅频特性达到峰值, 此时线路对电流衰减效果最小, $f > f_r$, 随着频率逐渐升高, 线路对电流衰减效果最大。因此, 电流信号的频率在 400~1500 Hz 之间时不受线路衰减以及负荷和分布式电源等的影响, 本文选取 400~1500 Hz 的特征频段进行分析。

3.2 Pearson 相关系数和广义 S 变换

作为一种常见的相关系数法, Pearson 相关系数法又称积差相关系数法, 定义取值区间为 $[-1, 1]$, 取值的绝对值越大, 两个量的相关性就越强, 正负则代表正相关与负相关, 0 代表两个信号完全独立, 该方法普遍用于定性分析两组数据的相关性, 在故障领域有广泛应用^[22-24]。

对于线路 i 正负极线路首末两端电流差值, 描述其相似度的 Pearson 相关系数 p_i 的表达式为

$$p_i = \frac{\sum_{t=0}^N \Delta i_{pi}(t) \Delta i_{ni}(t)}{\left(\sum_{t=0}^N \Delta i_{pi}^2(t) \sum_{t=0}^N \Delta i_{ni}^2(t) \right)^{0.5}} \quad (10)$$

式中: $\Delta i_{pi}(t)$ 、 $\Delta i_{ni}(t)$ 为线路 i 在 t 时刻正负极首尾端电流的差值; N 为采样点个数。

S 变换是在小波变换和短时傅里叶变换基础上拓展得出的一种时频分析的信号处理方法, 它继承了两者的优点, 在低频段有良好的频率分辨率, 高频段则有良好的时域分辨率, 在信号处理领域应用非常广泛^[25-28]。由于直流微电网特有的分布式电源以及馈线衰减作用对电流量的影响, 本文选用 S 变换提取出电流的故障特征频段。

对连续函数 $x_1(t)$ 进行 S 变换, 定义为

$$S_1(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t) \omega(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (11)$$

式中: $\omega(\tau - t, f)$ 为高斯窗口函数; τ 为控制高斯窗口的时移参数; f 为频率。其中

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|^b}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2b}}{2a^2}} \quad (12)$$

为了解决 S 变换高频信号分量出现频率混叠现象的问题, 在 S 变换的基础上提出了广义 S 变换^[29]。广义 S 变换相对于 S 变换, 区别在于高斯窗口函数 $\omega(\tau - t, f)$ 中引入了调节因子 a 、 b , 引入调节因子后的高斯窗口函数 $\omega'(\tau - t, f)$ 为

$$\omega'(\tau - t, f) = \frac{|f^b|}{a\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2b}}{2a^2}} \quad (13)$$

对应的广义 S 变换为

$$S_1'(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t) \frac{|f^b|}{a\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2b}}{2a^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (14)$$

在实际工程中, 处理的信号一般是离散的, 连续信号 $x_1(t)$ 的离散形式为 $x_2(hT)$, 其中 T 为相邻两采样时刻的时间间隔; h 表示信号的离散序号, $h = 0, 1, \dots, N-1$ 。

时间与频率离散化, 令 $\tau = uT$, $f = n/NT$, 进而得到离散信号 $x_2(hT)$ 的 S 变换复数矩阵。

$$S_2[uT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X_2[\frac{m+n}{NT}] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mu}{N}}, n \neq 0 \quad (15)$$

$$S_2[uT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{N-1} X_2(hT), n = 0 \quad (16)$$

式中: $u, m, n = 0, 1, \dots, N-1$; u 表示 S 变换的序列号; n 为频率变量; m 为位移变量; $X_2[\frac{m+n}{NT}]$ 由 $x_2(hT)$ 离散快速傅里叶变换后移位得到。其中

$$X_2[\frac{n}{NT}] = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{N-1} x_2(hT) e^{-\frac{j2\pi nh}{N}} \quad (17)$$

对离散信号的广义 S 变换为

$$S_2'[uT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X_2[\frac{m+n}{NT}] e^{-\frac{2\pi^2 m^2 a^2}{n^{2b}}} e^{\frac{j2\pi mu}{N}}, n \neq 0 \quad (18)$$

$$S_2'[uT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{N-1} X_2(hT), n = 0 \quad (19)$$

本文令调节因子 $a = 5$ 、 $b = 1$ ^[25]。

3.3 S 变换能量和

由于本文变量为故障后暂态电流量, 故引入 S 变换能量和的概念^[30]。定义某一采样点电流量在特定频率 f 下 S 变换的能量为

$$E(uT, f) = \text{abs}(S_2'[uT, f]) \quad (20)$$

基于采样值原理, 将所有采样点特征频段的暂态能量求和, 得到线路特征频段能量和, 如式(21)所示。

$$W = \sum_{f=f_{\min}}^{f=f_{\max}} \sum_{u=1}^{N-1} E(uT, f) \quad (21)$$

式中, f_{\min} 与 f_{\max} 分别为 400 Hz 与 1500 Hz。

发生单相接地故障时, 在特征频段下故障极的暂态能量和一定大于非故障极; 发生极间故障时, 正负两极的暂态能量和近似相等, 利用上述特征差异, 可以构造判别判据。

3.4 低压直流微电网故障选线方法

当直流微电网线路发生单极故障时, 由 2.1 节的分析可知, 非故障线路正负极首末端电流差应近

似正相关；故障线路正负极首末端电流差相关性较低。发生极间故障时，非故障线路正负极首尾电流差应近似正相关；故障线路正负极首尾电流差负相关，结合 Pearson 相关系数，定义各线路正负极首尾电流差，则可构造故障线路判据如下。

$$p_i < 0.1 \quad \text{线路 } i \text{ 故障时} \quad (22)$$

$$p_i > 0.1 \quad \text{线路 } i \text{ 正常时} \quad (23)$$

根据之前的分析，当线路为非故障线路时，Pearson 相关系数接近于 1，当判断线路为故障线路时，继续判断故障极或极间故障。

利用式(15)一式(21)，计算正负极两极线路首端电流在特征频段的暂态能量和，分别记为 W_{pi} 和 W_{ni} 。定义线路 i 正、负极能量和之比为 $W_i = W_{pi}/W_{ni}$ ，据此可构成故障极识别判据，如式(24)和式(25)所示。

$$W_i > 1 + k' \quad (24)$$

$$W_i < 1 - k' \quad (25)$$

式中， k' 为可靠系数，综合灵敏性和可靠性要求， k' 取 0.1。满足式(24)时，判定线路正极发生故障；满足式(25)时，判定线路负极发生故障；否则，判定线路发生极间故障。

3.5 故障选线流程图

根据上述分析，基于故障线路识别判据、故障极识别判据，设计出如图 5 所示的故障选线流程图。

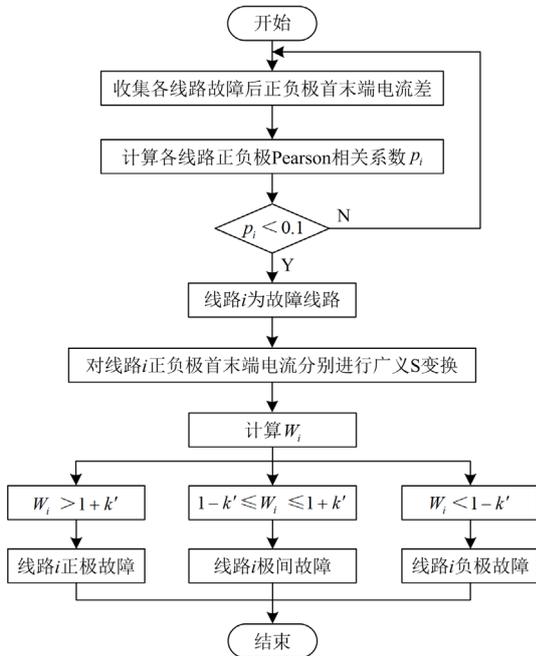


图 5 故障选线流程图

Fig. 5 Flow chart of fault line selection

当系统启动后，首先收集直流微电网各条线路首末端的电流突变量信息，根据上述分析，在 20 ms

数据窗内，计算各条线路正负极首末端电流差等数据，再根据式(10)计算各线路 p_i ，选线装置通过比较 p_i 和所设置阈值的关系判断故障线路。根据式(21)计算故障线路正、负极首端电流的广义 S 变换暂态能量和，并计算正、负极能量和之比。由能量和的比值判据判断故障极线以及是否为极间故障。

4 仿真实验

4.1 仿真参数

本文基于 PSCAD 软件搭建 400 V 辐射状低压直流微电网模型，如图 1 所示。该模型包括 5 条线路，通过变流器连接 10 kV 交流电网。具体仿真参数如下：直流母线电压为 ± 400 V；蓄电池、风电机组、光伏新能源输出功率均为 25 kW。线路 1—5 的长度为 4 km，均采用频变参数模型(frequency dependent (phase) model, FDPM)的同轴电缆，单位长度电缆的电阻值为 $0.04 \Omega/\text{km}$ ，电感值为 $0.017 \text{ mH}/\text{km}$ 。通过设置图 1 中不同位置的故障进行选线方法可行性的验证。数据采样频率设置为 10 kHz，数据窗口选择为 20 ms，1 s 时发生故障，故障持续时间为 0.1 s。

4.2 单极故障选线

图 6 为线路 1 发生正极故障时的正负极首末端电流差图，图中蓝色曲线代表正极，红色曲线代表负极，1 s 时发生故障，线路 2—5 正负极首末端电流差相似度极高，而线路 1 正负极首末端电流差相似度极低，确定线路 1 为故障线路，进一步判断故障极。

图 7 为对线路 1 的正负极首端电流在 400~1500 Hz 特征频段内进行广义 S 变换后的幅频曲线图。将广义 S 变换后的数据进行求和，得到正负极能量和之比为 2.4740，利用式(24)，确定线路 1 正极发生单极故障。

图 8 为线路 2 发生负极故障时的正负极首末端电流差图，图中蓝色曲线代表正极，红色曲线代表负极，1 s 时发生故障，其余线路首末端电流差相似度极高，而线路 2 正负极首末端电流差相似度极低，确定线路 2 为故障线路，进一步判断故障极。

图 9 为对线路 2 的正负极首端电流在 400~1500 Hz 特征频段内进行广义 S 变换后的幅频曲线图。将广义 S 变换后的数据进行求和，得到正负极能量和之比为 0.0743，利用式(25)，确定线路 2 负极发生单极故障。

针对线路 1—5 分别进行正负极单极故障，各条线路的 Pearson 相关系数、广义 S 变换后能量和之

比以及选线结果如表 1 所示。由表 1 仿真结果可知, 当线路发生单极故障时, 无论是正极故障还是负极故障, 本文所提方法均可以准确识别出故障线路以及故障极。

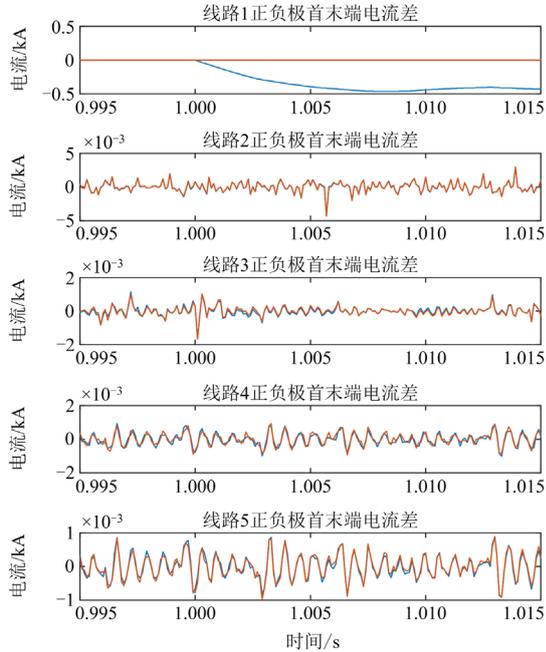


图 6 线路 1 正极故障时各线路正负极电流差图

Fig. 6 Positive and negative current difference diagram of each line when Line 1 positive fault

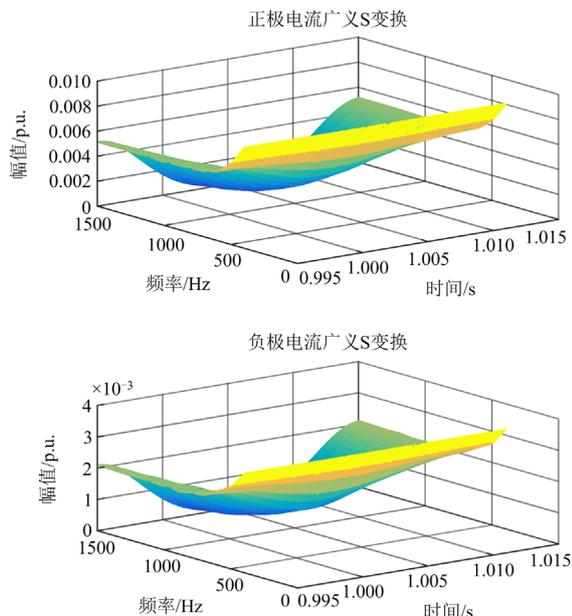


图 7 线路 1 特征频段正负极电流广义 S 变换幅频图

Fig. 7 Generalized S transform amplitude-frequency diagram of positive and negative current in characteristic frequency band of Line 1

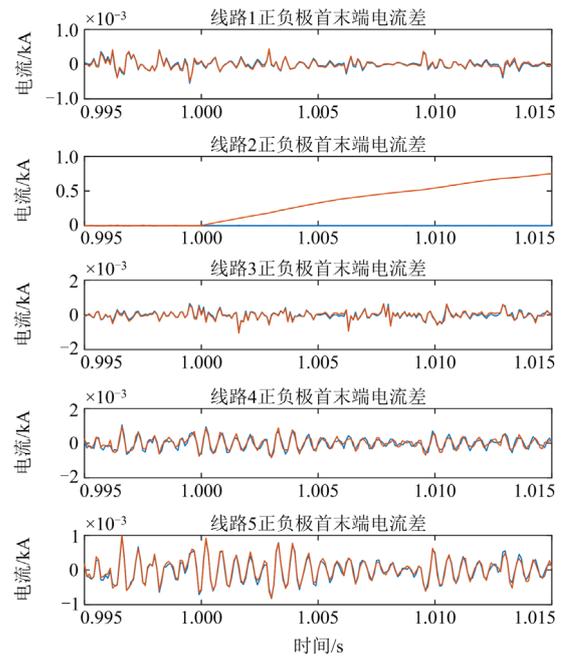


图 8 线路 2 负极故障时各线路正负极电流差图

Fig. 8 Positive and negative current difference diagram of each line when Line 2 negative fault

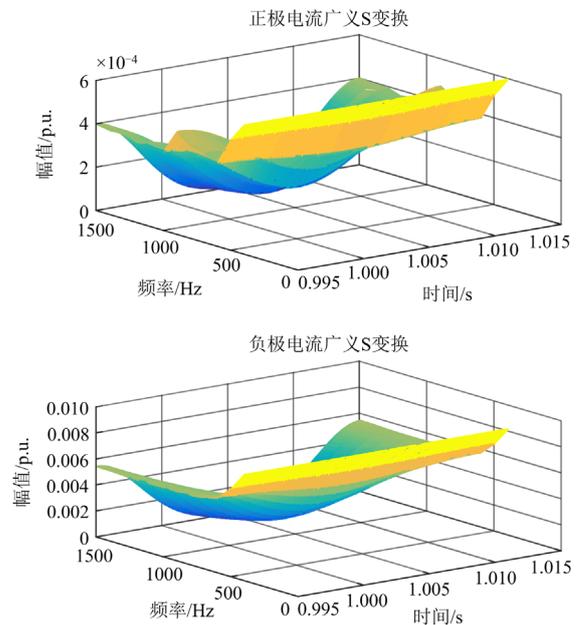


图 9 线路 2 特征频段正负极电流广义 S 变换幅频图

Fig. 9 Generalized S transform amplitude-frequency diagram of positive and negative current in characteristic frequency band of Line 2

4.3 极间短路故障选线

图 10 为线路 4 发生极间故障时的正负极首末端电流差图, 图中蓝色曲线代表正极, 红色曲线代表

表 1 不同线路的正负极单极故障仿真结果

Table 1 Simulation results of positive and negative unipolar faults of different lines

故障类型	故障线路	Pearson 相关系数					正负极能量和之比	选线结果
		线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
正极故障	1	-0.0082	0.9984	0.9677	0.9129	0.9774	2.4740	线路 1 正极
	2	0.9569	0.0307	0.9911	0.8976	0.9742	4.0300	线路 2 正极
	3	0.9624	0.9982	-0.0411	0.8905	0.9760	2.4415	线路 3 正极
	4	0.9775	0.9987	0.9807	-0.0091	0.9813	7.0694	线路 4 正极
	5	0.9780	0.9988	0.9849	0.9293	0.0571	3.5913	线路 5 正极
负极故障	1	-0.0690	0.9979	0.9729	0.8981	0.9726	0.7972	线路 1 负极
	2	0.9686	-0.0189	0.9591	0.8922	0.9794	0.0743	线路 2 负极
	3	0.9723	0.9986	0.0082	0.8939	0.9797	0.3815	线路 3 负极
	4	0.9740	0.9986	0.9579	0.0120	0.9827	0.0622	线路 4 负极
	5	0.9649	0.9985	0.9726	0.9176	0.0124	0.1454	线路 5 负极

负极, 1 s 发生故障, 其余线路正负极首末端电流差相似度极高, 而线路 4 正负极首末端电流差相似度为负相关, 确定线路 4 为故障线路, 进一步判断故障极还是极间故障。

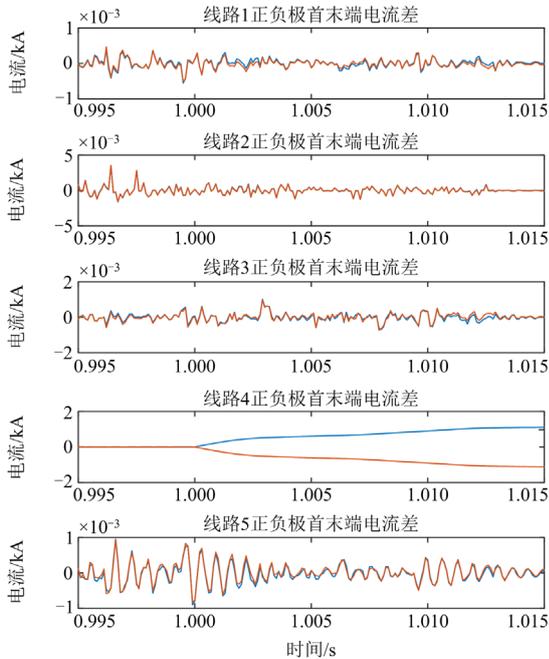


图 10 线路 4 极间故障时各线路正负极电流差图

Fig. 10 Positive and negative current difference diagram of each line when Line 4 inter-pole fault

图 11 为对线路 4 的正负极电流在 400~1500 Hz 特征频段内进行广义 S 变换后的幅频曲线图。将广义 S 变化后的数据进行求和, 得到正负极能量和之比为 1.0004, 利用式(24)与式(25), 确定线路 4 发生极间故障。

针对线路 1—5 分别进行极间短路故障, 各条线路的 Pearson 相关系数、广义 S 变换后能量和之比以及选线结果如表 2 所示。可以得出在极间短路故

障时, 本文所设计的选线方法有效。

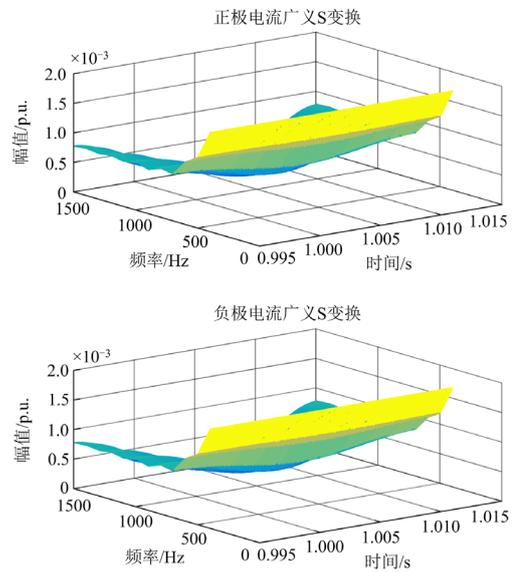


图 11 线路 4 特征频段正负极电流广义 S 变换幅频图

Fig. 11 Generalized S transform amplitude-frequency diagram of positive and negative current in characteristic frequency band of Line 4

4.4 过渡电阻对选线的影响

在线路 2 上设置正极故障, 故障距离为 2 km, 模拟不同过渡电阻对所提方法准确性的影响, 结果如表 3 所示。由仿真结果可得, 在过渡电阻分别为 1 Ω、5 Ω、10 Ω、15 Ω、20 Ω 时, 故障线路选线结果均正确无误, 说明本文方法在不同过渡电阻时的适用性。

4.5 不同故障距离对选线的影响

在线路 3 上设置正极故障, 过渡电阻为 0.01 Ω, 故障距离为 1 km、1.5 km、2 km、2.5 km、3 km, 模拟不同故障距离对所提方法准确性的影响, 结果如表 4 所示。由仿真结果可知本文方法在不同故障距离时的适用性。

表 2 不同线路的极间故障仿真结果

Table 2 Simulation results of interpole faults for different lines

故障线路	Pearson 相关系数					正负极能量和之比	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
1	-1.0000	0.9976	0.9517	0.7824	0.9679	0.9831	线路 1 极间
2	0.9393	-1.0000	0.9327	0.7857	0.9602	0.9574	线路 2 极间
3	0.9438	0.9978	-1.0000	0.8094	0.9616	0.9983	线路 3 极间
4	0.9452	0.9977	0.9395	-1.0000	0.9764	1.0004	线路 4 极间
5	0.9544	0.9983	0.9564	0.8147	-1.0000	1.0003	线路 5 极间

表 3 线路 2 正极故障时不同过渡电阻仿真结果

Table 3 Simulation results of different transition resistors when Line 2 fault at positive pole

过渡电阻/ Ω	Pearson 相关系数					正负极能量和之比	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
1	0.9834	0.0243	0.9937	0.8991	0.9887	2.1637	线路 2 正极
5	0.9836	0.0472	0.9937	0.9017	0.9891	1.2577	线路 2 正极
10	0.9834	0.0581	0.9936	0.8978	0.9886	1.2015	线路 2 正极
15	0.9740	0.0547	0.9686	0.8926	0.9769	2.0316	线路 2 正极
20	0.9743	0.0751	0.9688	0.8910	0.9765	2.1951	线路 2 正极

表 4 线路 3 正极故障时不同故障距离仿真结果

Table 4 Simulation results of different fault distances when Line 3 fault at positive pole

故障距离/km	Pearson 相关系数					正负极能量和之比	选线结果
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5		
1	0.9687	0.9980	0.0025	0.8444	0.9673	2.8512	线路 3 正极
1.5	0.9726	0.9982	0.0047	0.8506	0.9643	2.3444	线路 3 正极
2	0.9624	0.9982	0.0411	0.8905	0.9760	2.4415	线路 3 正极
2.5	0.9681	0.9980	0.0402	0.8324	0.9623	2.5575	线路 3 正极
3	0.9836	0.9979	0.0081	0.8612	0.9976	2.0670	线路 3 正极

5 结论

针对低压直流微电网故障选线方法尚不完善的问题, 本文针对不同故障特征, 提出了一种基于 Pearson 相关系数与广义 S 变换的故障选线方法。在理论分析的基础上, 对方法进行仿真验证, 得出以下结论:

1) 在分析故障特征的基础上, 利用 Pearson 相关系数与广义 S 变换相结合的选线方法, 克服了大部分选线方法只针对单极故障的缺点, 可以对单极故障以及极间故障进行有效识别。

2) 该选线方法可以克服频域故障检测方法计算量大的缺点, 先用 Pearson 相关系数选出故障线路, 再对故障线路正负极进行频域上的广义 S 变换, 减少了计算量, 有效加快了故障选线速度。

3) 该选线方法可适用于低压直流微电网系统, 可实现有效故障选线, 且耐受过渡电阻能力强, 不受故障距离的影响。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展白皮书[R/OL]. [2020-12-21]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm.
- [2] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [3] 王凌云, 徐健哲, 李世春, 等. 考虑电-气-热需求响应和阶梯式碳交易的综合能源系统低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 45-52.
WANG Lingyun, XU Jianzhe, LI Shichun, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering electricity-gas-heat demand response and tiered carbon trading[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 45-52.
- [4] MI Yuanze, LIU Chunyang, YANG Jinye, et al. Low-carbon generation expansion planning considering uncertainty of

- renewable energy at multi-time scales[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(3): 261-272.
- [5] 张瑶, 王傲寒, 张宏. 中国智能电网发展综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 180-187.
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 180-187.
- [6] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [7] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 2-17.
- [8] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—a case study[J]. *Protection & Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(3): 245-256.
- [9] 康家玉, 陈馨儿, 史晨雨. 基于储能荷电状态分级的直流微电网协调控制方法[J]. *热力发电*, 2022, 51(5): 127-135.
KANG Jiayu, CHEN Xiner, SHI Chenyu. A coordinated control method for DC microgrid based on energy storage and SOC classification[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(5): 127-135.
- [10] 汪洋, 陈风云, 肖文, 等. 考虑不确定性和含换电站的直流微电网优化研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(7): 46-51.
WANG Yang, CHEN Fengyun, XIAO Wen, et al. Optimization of DC microgrid considering uncertainty and battery swap station[J]. *Smart Power*, 2020, 48(7): 46-51.
- [11] LI Chengyu. A Pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(16): 4943-4953.
- [12] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(13): 7-12, 185.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(13): 7-12, 185.
- [13] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. *高电压技术*, 2020, 46(7): 2241-2254.
NIAN Heng, KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(7): 2241-2254.
- [14] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57-70.
- [15] 孔亮. 直流微电网短路故障保护关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
KONG Liang. Research on key technologies of short circuit fault protection for DC microgrid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [16] 高淑萍, 段必聪, 宋国兵, 等. 基于暂态电流故障分量的直流配电网单极故障选线方法[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(3): 141-146.
GAO Shuping, DUAN Bicong, SONG Guobing, et al. Single-pole fault line selection method for DC distribution network based on transient current fault component[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 141-146.
- [17] 殷浩然, 苗世洪, 郭舒毓, 等. 基于 S 变换相关度和深度学习的配电网单相接地故障选线新方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(7): 88-96.
YIN Haoran, MIAO Shihong, GUO Shuyun, et al. Novel method for single-phase grounding fault line selection in distribution network based on S-transform correlation and deep learning[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(7): 88-96.
- [18] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. *高电压技术*, 2018, 44(2): 440-447.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(2): 440-447.
- [19] MONTOYA R, POUDEL B P, BIDRAM A, et al. DC microgrid fault detection using multiresolution analysis of traveling waves[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 135.
- [20] 邓丰, 梅龙军, 唐欣, 等. 基于时频域行波全景波形的配电网故障选线方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(13): 2861-2870.
DENG Feng, MEI Longjun, TANG Xin, et al. Faulty line selection method of distribution network based on time-frequency traveling wave panoramic waveform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(13): 2861-2870.
- [21] 曾钰. 辐射状直流配电网故障选线与保护方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZENG Yu. Study on the faulty feeder selection and protection principle of radial DC distribution grid[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [22] FARSHAD M, SADEH J. A novel fault-location method

- for HVDC transmission lines based on similarity measure of voltage signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2483-2490.
- [23] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32, 53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.
- [24] 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.
- [25] ZHAO Pu, CHEN Qing, SUN Kongming, et al. A current frequency component-based fault-location method for voltage-source converter-based high-voltage direct current (VSC-HVDC) cables using the S transform[J]. Energies, 2017, 10(8): 1-15.
- [26] 杨志勇, 杨炳元, 任永峰, 等. 基于单端高频电流量的 MMC-MTDC 输电线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 151-160.
YANG Zhiyong, YANG Bingyuan, REN Yongfeng, et al. Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 151-160.
- [27] 权文杰, 童晓阳, 张广骁. 基于 S 变换行波能谱矩阵相似度的柔性直流单端保护方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 178-186.
QUAN Wenjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Single-end flexible DC protection scheme based on similarity of S-transform energy spectrum matrix of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 178-186.
- [28] 崔芮华, 佟德栓, 李泽. 基于广义 S 变换的航空串联电弧故障检测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8241-8250.
CUI Ruihua, TONG Deshuan, LI Ze. Aviation arc fault detection based on generalized S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8241-8250.
- [29] 徐才宝. 基于 GST-TT 变换的高压直流输电线路故障测距方法[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
XU Caibao. HVDC transmission line fault ranging method based on GST-TT transform[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [30] 吴浩. 基于 S 变换样本熵的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 15-22.
WU Hao. A new pilot protection principle based on S-transform sample entropy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 15-22.

收稿日期: 2022-12-20; 修回日期: 2023-04-11

作者简介:

高淑萍(1970—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电、混合直流输电、新能源并网关键技术; E-mail: gao.sp2003@163.com

李晓芳(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为低压直流微电网的故障选线方法。E-mail: 705772659@qq.com

(编辑 周金梅)