

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.07.022

基于S变换模能量分析的直流电缆故障测距

夏向阳¹, 刘奕炫¹, 刘雄¹, 夏君山², 王瑞琪², 朱鹏¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114; 2. 金杯电工衡阳电缆有限公司, 湖南 衡阳 421007)

摘要: 针对现有高压直流电缆故障定位方法故障定位精度低、定位模型泛化能力差等问题,文中在考虑电缆故障后故障点产生的暂态信号中含有丰富的故障信息的特征,提出一种时频域能量分析的故障测距方法。该方法利用多分类支持向量机(SVM)的特性构建直流电缆故障定位模型,利用直流电缆相模解耦矩阵对电缆电气量解耦,并采用S变换进行时频域变换,将得到的模量构造模能量,将其作为样本对SVM模型训练。实验结果表明,所提方法对于不同故障类型在不同过渡电阻及不同位置故障下均可进行准确测距。

关键词: S变换; SVM模型; 相模解耦; 模能量; 故障定位

Fault Location of DC Cable Based on S-transform Mode Energy Analysis

XIA Xiangyang¹, LIU Yixuan¹, LIU Xiong¹, XIA Junshan², WANG Ruiqi², ZHU Peng¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Jinbei Electric Hengyang Cable Co., Ltd., Hunan Hengyang 421007, China)

Abstract: In view of such issues as low accuracy of fault location and weak generalization ability of location model in the fault location method of existing high voltage DC cable, a kind of fault location method of time-frequency domain energy analysis is proposed with consideration of the characteristics of rich fault information in the transient signal generated by the fault point after the fault of the cable. The method uses the characteristics of multi-class support vector machine to construct a DC cable fault location model, uses the DC cable phase mode decoupling matrix to decouple the electrical parameters of the cable, and adopts the S-transform to perform time-frequency domain conversion. The obtained modulus is used to construct mode energy and is used as the sample to train the SVM model. The experimental results show that the proposed method can accurately measure the distance of different types of faults under different transition resistances and different locations.

Key words: S-transform; SVM model; phase mode decoupling; mode energy; fault location

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的制定及新型电力系统的发展,中国在“十四五”期间将继续大力发展以青海—河南风光新能源以及上海、广东沿海区域海上风力发电等地区为代表的新能源发电技术及先进输电技术。电力电缆作为新能源传输的重要载体,在输配电系统中扮演着不可或缺的角色^[1-6]。

以海上发电技术为例,随着海上光伏发电、海

上风电等海上发电项目日益增多,架空线难以支撑起电力传输的需求,海底电缆正在被广泛应用^[7-10]。但因直流电缆常深埋于海底,故障发生时难以有效地判断其故障点发生位置^[11-13],最终造成并网失败及大规模停电事故。因此如何在直流段电缆发生故障时,迅速有效的确定故障位置尤为重要。直流电缆在发生故障后,故障点产生向线路两端传播的故障暂态信号,信号中包含了丰富的故障信息,且信号沿线路传播时的衰减与传播长度有关,因此在

收稿日期:2024-02-20; 修回日期:2024-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51977014);湖南省自然科学基金项目(2020JJ6054);湖南省教育厅科学研究重点项目(22A0230)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51977014), Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ6054), Key Scientific Research Project of Hunan Provincial Department of Education(22A0230).

直流电缆两端采集的暂态故障信号中也包含着故障点位置信息。

文[14]利用线路的双端距离继电器测距仪数据和故障录波装置电气量数据以加权系数的方式进行数据融合,进而求解出故障距离。文[15]将固有频率附近的故障行波能量作为主要的分析对象,采用小波变换提取7尺度的小波信号能量,并将其输入具有的非线性函数逼近拟合能力的人工神经网络(ANN)中进行训练、测试,最终进行故障定位。文[16]通过分析故障高频信号在换流器开关过程中形成的回路,建立不受控制策略影响的换流器高频恒定阻抗等效模型,在该模型上提出利用系统故障前后几秒的电气量数据进行对高频信号的分析,以高频分量映射故障区段。

虽然上述方法利用故障信号能量进行故障测距,但是都仅针对单一尺度或固定高频信号进行分析,而直流电缆故障后的暂态信号易受到环境的影

响导致某些频带的信号发生变化,仅通过单一频率信号测距结果容易产生误差。因此为防止干扰信号对故障测距精度的影响,文中从故障暂态信号能量的角度出发,将采集的故障后5 ms的电气量相模解耦,并利用S变换对模量进行时频变换,构造出全频域上的不同频带的模能量,将各模能量与总暂态能量比值作为输入样本,对多分类SVM模型进行训练、测试,建立直流电缆故障定位的多分类SVM模型。最后,采用PSCAD/Emtdc进行不同类型下不同过渡电阻和不同故障点的故障仿真。

1 理论分析

1.1 直流输电线路

双极 VSC-HVDC 系统的结构简图见图 1,此系统主要由交流电源、变压器、整流器、平波电抗器、直流滤波器、滤波器、直流输电线路、逆变器等构成^[17-21]。

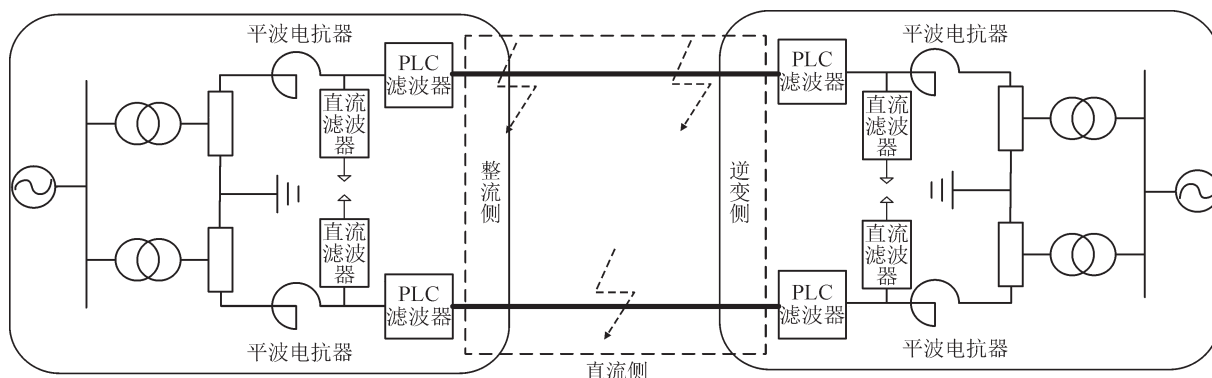


图1 双极 VSC-HVDC 系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bipolar VSC-HVDC System

高电压、长距离的直流电力电缆,在正常运行过程中,电缆各点的电压、电流由于电缆线路分布参数的影响均不同,且两者不仅随时间发生变化,在空间上也存在较大差异^[17-20],其分布参数模型见图2。

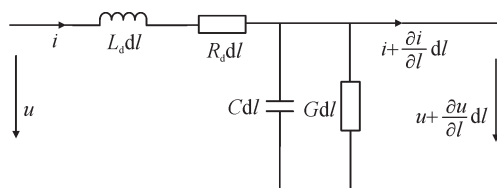


图2 直流电缆分布参数模型

Fig. 2 DC cable circuit diagram

如图2所示可得单位长度直流电力电缆电压电流关系:

$$u - (u + \frac{\partial u}{\partial l} dl) = L_d dl \frac{\partial i}{\partial t} + i R_d dl \quad (1)$$

$$i - (i + \frac{\partial i}{\partial l} dl) = G dl (u + \frac{\partial u}{\partial l} dl) + C dl \frac{d(u + \frac{\partial u}{\partial l} dl)}{dt} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: l 为直流电缆的长度; dl 为单位长度电缆; i 为进线电流; u 为直流电力电缆进线端电压; $i + \frac{\partial i}{\partial l} dl$ 为出线电流; $u + \frac{\partial u}{\partial l} dl$ 为出线端电压; L_d 、 R_d 、 C 、 G 分别为直流电缆单位长度电感、电阻、电容、电导。

由式(1)、(2)可得:

$$-\frac{\partial u}{\partial l} = L_d \frac{\partial i}{\partial t} + i R_d \quad (3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial l} = G u + C \frac{du}{dt} \quad (4)$$

对式(3)、(4)两边分别求长度 l 的偏导得到:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial l^2} - L_d C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (L_d G + R_d C) \frac{\partial u}{\partial t} - R_d G u = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial l^2} - L_d C \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - (L_d G + R_d C) \frac{\partial i}{\partial t} - R_d G i = 0 \quad (6)$$

联立式(3)-(6)求解可得:

$$u = B_1 e^{\gamma l} + B_2 e^{-\gamma l} \quad (7)$$

$$i = \frac{B_1 e^{\gamma l}}{Z} - \frac{B_2 e^{-\gamma l}}{Z} \quad (8)$$

$$\gamma = \sqrt{(G + j\omega C)(R_d + j\omega L_d)} \quad (9)$$

$$Z = \sqrt{\frac{R_d + j\omega L_d}{G + j\omega C}} \quad (10)$$

式(7)–(10)中: B_1 、 B_2 为边界条件所决定条件参数; γ 为直流电缆传播系数; Z 为直流电缆的传播阻抗^[21–23]。

由式(7)–(10)可知, 电感和电阻形成的感抗使得进线电压和出线电压发生偏移, 电容和电导产生的容抗让进线电流发生了变化, 其主要是由串联电感的感抗特性和并联分布电容的分流引起的, 且衰减情况与频率有关。

1.2 S变换

在对信号提取分析中, 傅里叶变化对突变信号的分析效果不是很理想; 短时傅里叶由于时间窗固定, 在对长周期信号分解时, 可能会产生分解错误; 小波变化虽有较好的多分辨率分析, 但是其母小波及尺度函数的选取较困难。S变换介于短时傅里叶与小波变换之间, 结合两种方法的优点, 可自适应调节分辨率且其逆变换无损可逆。

S变换作为连续小波变换的相位修正, 避免了小波基的选择, 保证了数据处理结果的准确性^[24–25]。其继承了小波变换和傅里叶变换各自的优点, 可以提取信号的时频特性, 相较于小波变换存在更丰富的频谱信息, 可以用于对信号的分离。

对于连续信号, S变换定义为:

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

$$\omega(t - \tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right\} \quad (12)$$

式(11)、(12)中: $\omega(t - \tau, f)$ 为S变换使用的窗函数, 即高斯窗口; τ 是控制高斯窗口的时移参数; f 代表频率。高斯窗口是频率的函数, 其宽度和高度可随频率的变化而变化。

对于离散型信号, S变换的定义为:

$$S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}} \quad n \neq 0 \quad (13)$$

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m}{NT}\right] \quad n = 0 \quad (14)$$

式(13)、(14)中: $k, m, n \in (0, N-1)$; N 是离散信号的采样点数量; T 是采样间隔; $X\left[\frac{n}{NT}\right]$ 和 $e^{\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}}$ 分别是离散信号和高斯窗函数的傅里叶变换结果。

2 模分量S能量谱

2.1 相模解耦

直流电缆为单芯结构, 从外到内有3层, 分别为铠装层、屏蔽层和线芯。为了对直流电缆耦合现象进行详细分析, 需要分别对直流电缆整流端和逆变侧两端的铠装层、屏蔽层和线芯电压电流进行解耦。正负极直流电缆等效电路图见图3。

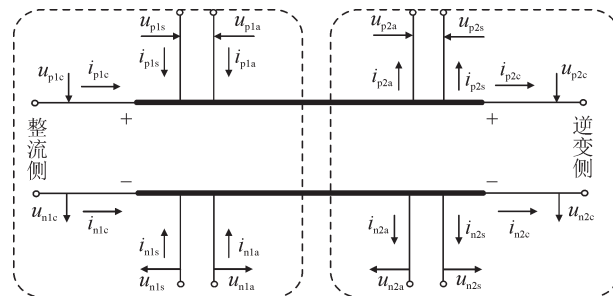


图3 正负极直流电缆等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of positive and negative DC cables

图3中: p 为正极电缆; n 为负极电缆; 左侧为整流端, 用下标1表示; 右侧为逆变侧, 用下标2表示; 铠装层、屏蔽层和线芯3层分别用 a 、 s 、 c 表示; u_{p1c} 、 u_{p2c} 、 i_{p1c} 、 i_{p2c} 分别为正极直流电缆线芯电压电流; u_{p1s} 、 u_{p2s} 、 i_{p1s} 、 i_{p2s} 分别为正极直流电缆屏蔽层电压电流; u_{p1a} 、 u_{p2a} 、 i_{p1a} 、 i_{p2a} 分别为正极直流电缆铠装层电压电流; u_{n1c} 、 u_{n2c} 、 i_{n1c} 、 i_{n2c} 分别为负极直流电缆线芯电压电流; u_{n1s} 、 u_{n2s} 、 i_{n1s} 、 i_{n2s} 分别为负极直流电缆屏蔽层电压电流; u_{n1a} 、 u_{n2a} 、 i_{n1a} 、 i_{n2a} 分别为负极直流电缆铠装层电压电流。

直流电缆的分布参数模型所得的电缆方程得到正极电缆波过程方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial x} = -\mathbf{L}_d \frac{\partial \mathbf{i}_1}{\partial t} - \mathbf{i}_1 \mathbf{R}_d \\ \frac{\partial \mathbf{i}_1}{\partial x} = -\mathbf{G} \mathbf{u}_1 - \mathbf{C} \frac{d\mathbf{u}_1}{dt} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: $\mathbf{u}_1 = [u_{p1c}, u_{n1c}, u_{p1s}, u_{n1s}, u_{p1a}, u_{n1a}]$; $\mathbf{i}_1 = [i_{p1c}, i_{n1c}, i_{p1s}, i_{n1s}, i_{p1a}, i_{n1a}]$ 。由于直流电缆屏蔽层和铠装层的存在, 不能再使用和传统架空线路一样的两行两列矩阵进行解耦, 而且解耦的目的是为了消除各个量之间的相互干扰。对于高维向量, 可采用卡伦鲍尔变换矩阵进行解耦, 解耦矩阵为

$$\mathbf{P} = \mathbf{k} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(16)中: $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{0}$ 分别为二阶单位矩阵和零矩阵; $\mathbf{k}$ 是卡伦鲍尔变换矩阵, 矩阵表达式为

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

设 $Q=P^{-T}$, 将 Q 当作直流电缆电流的相模变换矩阵, 将式(15)的电压电流表达式分别采用 P 和 Q 相模变换矩阵进行解耦, 则式(15)解耦后得到式(18)为

$$\begin{cases} \frac{\partial u_{1m}}{\partial x} = -P^{-1}RQ i_{1m} - P^{-1}LQ \frac{\partial i_{1m}}{\partial t} \\ \frac{\partial i_{1m}}{\partial x} = -Q^{-1}GP u_{1m} - Q^{-1}CP \frac{\partial u_{1m}}{\partial t} \end{cases} \quad (18)$$

以直流电缆直流电流模量为例, 由式(18)解耦后得到

$$i_{1m} = Q^{-1} i_1 = \begin{bmatrix} i_{p1c} + i_{n1c} + i_{p1s} + i_{n1s} + i_{p1a} + i_{n1a} \\ i_{p1c} - i_{n1c} + i_{p1s} - i_{n1s} + i_{p1a} - i_{n1a} \\ i_{p1c} + i_{n1c} + i_{p1s} + i_{n1s} \\ i_{p1c} - i_{n1c} + i_{p1s} - i_{n1s} \\ i_{p1c} + i_{n1c} \\ i_{p1c} - i_{n1c} \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(19)可知, 正负双极直流电缆经解耦后得到关于直流电缆电压电流6个模量。以电流模量为例, 1模电流 $i_{1m}(1)=[i_{p1c}+i_{n1c}+i_{p1s}+i_{n1s}+i_{p1a}+i_{n1a}]$ 。当线路正常运行时, 绘制直流电缆6个模量的衰减图谱, 见图4。

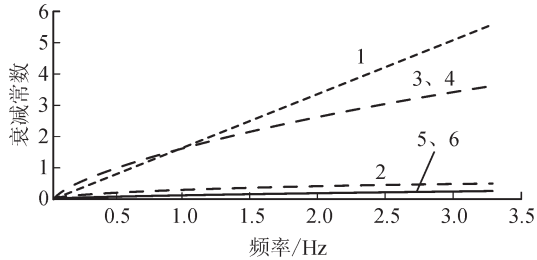


图4 直流电缆各模量的衰减图谱

Fig. 4 Attenuation spectrum of each modulus of DC cable

由图4可看出, 2、5、6模量在直流电缆中的衰减常数稳定, 随着频率的增加也不会发生很大的变化; 1、3、4模量的衰减常数受频率的影响较大, 不宜用于故障测距。由式(19)可知, 直流电缆的2模量不仅需要直流电缆的线芯电流, 还需要屏蔽层电流才可得, 而5、6模量只需要直流电缆线芯电流, 所以优先选择直流电缆的5、6模量进行故障测距。

由式(18)得到直流电缆解耦后的5、6模量为:

$$\begin{bmatrix} u_{1m}(5) \\ u_{1m}(6) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} u_{p1c} + u_{n1c} - u_{p1c} - u_{n1c} \\ u_{p1c} - u_{n1c} - u_{p1c} + u_{n1c} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1m}(5) \\ i_{1m}(6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{p1c} + i_{n1c} \\ i_{p1c} - i_{n1c} \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2 S能量谱

直流电缆不同位置发生故障时, 由故障点产生的暂态信号中的频率分量有所不同, 不用频率信号在直流电缆中的衰减常数有所不同, 能量在传输过程中的衰减也不同, 利用S变换得到的时频图谱不同。假设对一段时间5、6模能量进行S变换, 得到

时频域矩阵, 针对时频域图谱, 将故障暂态信号能量分解为 M 个频带, 并把每个频带的频域波形等分为 N 个时间段, 将整个时频域图分解成 $M \times N$ 个小块, 分析每个时频小块的能量差异性可以进行故障测距。在频带 j 中第 i 个时间段的能量谱小块为

$$E_j^i = \sum_{k=i_1}^{i_2} |d_j(k)| \quad (22)$$

式(22)中: $d_j(k)$ 是频带 j 内, 每个采样时间点的实部幅值; i_1 和 i_2 是第 i 个时间段的起始时间和终止时间。根据式(4)–(8)可以得到时频谱矩阵

$$E_{M \times N} = \begin{bmatrix} E_1^1 & E_1^2 & \cdots & E_1^N \\ E_2^1 & E_2^2 & \cdots & E_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_M^1 & E_M^2 & \cdots & E_M^N \end{bmatrix} \quad (23)$$

对故障暂态信号进行S变换分解, 其特征能量谱的提取方法为:

1) 采集直流电缆故障时两端的线芯电压电流信号和屏蔽层电压信号, 采用相模解耦公式得到直流电缆的5、6模分量, 利用电压电流的5、6模电压电流两者的乘积在时间上的积分得到相应时间的5、6模能量。

2) 利用S变换对5、6模能量进行时频变换, 得到基于5、6模能量的时频图谱, 将整个时频域图分解成 $M \times N$ 个小块。

3) 将时频域能量作为基础, 由于不同位置故障和过渡电阻不同会影响时频域能量, 造成各个频带的能量不同, 所以可以将模能量作为故障测距的特征量。但是由于5、6模能量分解成各个频带后能量相差较大, 因此考虑构建5、6模各个频带的能量与总的5、6模故障能量形成比值, 将能量比作为特征量。

2.3 SVM支持向量机

设原始样本集 $a=\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 且样本集 a 中包含了两类样本, 每个样本 a_i 对应着一个样本标签 b_i , $b_i \in \{-1, 1\}$, 样本标签 b_i 代表了两个不同的标签, 即不同的 a_i 对应着的样本标签 b_i 只有两种表现形式。标签集 b_i 和样本集 a_i 共同组成二分类的SVM训练样本集。针对样本集线性化, 存在两种不同的应用形式。

2.3.1 样本集线性可分

此时可以对样本集中的数据直接进行线性分类, 设线性分离所用的超平面为

$$\omega \cdot a + \varphi = 0 \quad (24)$$

式(24)中: ω 为所构成的超平面的法向量; φ 是常数项。对于SVM支持向量机最优解的问题就是寻找最优的分类超平面, 转换到数学上就是寻找最优的 ω 和 φ , 在理论上最优的 ω 和 φ 可以使得SVM的分类间隔最大, 最终将寻优问题转换为一个二次规划的问题, 构造式(25)

$$\begin{cases} \min \frac{\|\omega^2\|}{2} + C \sum_{i=1}^N \xi_i \\ \text{s.t. } b_i(\omega \cdot a_i + \varphi) \geq 1 - \xi_i \quad \xi_i \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中: $C \sum_{i=1}^N \xi_i$ 是损失项; C 是损失系数。

因为SVM支持向量机的本质是寻求最优解, 因此原问题的解和最优解是等价的, 依据此得到

$$\begin{cases} \max_{\alpha} f(\alpha) = L(\omega, \varphi, \alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j b_i b_j a_i^T a_j \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \alpha_i b_i = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (26)$$

根据式(25)、(26)可以列出拉格朗日方程组为

$$\begin{cases} \omega_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^* a_i b_i \\ \varphi_0 = \frac{1}{m_1 + m_2} \left[\sum_{i=1}^{m_1} (1 - \omega_0 a_i^{s_1}) + \sum_{i=1}^{m_2} (-1 - \omega_0 a_i^{s_2}) \right] \end{cases} \quad (27)$$

式(27)中: $a_i^{s_1}$ 和 $a_i^{s_2}$ 分别是样本集 a 的正样本中第 i 个支持向量和负样本中第 i 个支持向量; m_1 是正样本空间支持向量个数; m_2 是负样本空间支持向量个数; α_i^* 是式(26)中所得到的拉格朗日最优乘子。

把所需要进行分析的数据 a' 输入到使用样本集训练后得到的SVM分类器中, 判断类别

$$\text{sgn}(\omega_0 a' + b_0) = \begin{cases} 1 & \text{判断为正样本类} \\ -1 & \text{判断为负样本类} \end{cases} \quad (28)$$

2.3.2 样本集线性不可分

此时不可再直接对数据进行线性分类, 若将一维的样本集 a 映射到三维甚至是多维空间则又可在多维空间上实现线性分类。设将非线性空间 a 转换为线性 C , 即映射结果变为 c_i 。此时式(26)变为

$$\begin{cases} \max_{\alpha} f(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j b_i b_j c(a_i)^T c(a_j) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \alpha_i b_i = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (29)$$

$$K = (a_i, a_j) = c(a_i)^T b(a_j), Q_{ij} = b_i b_j K(a_i, a_j), \text{则式(29)}$$

化简为

$$\begin{cases} \min_{\alpha} \left(\frac{1}{2} \alpha^T Q \alpha - e^T \alpha \right) \\ \text{s.t. } b^T \alpha = 0 \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \end{cases} \quad (30)$$

$K=(a_i, a_j)$ 是定义的核函数。

多分类SVM是在二分类SVM基础上的拓展, 将多个二分类SVM模型组合起来形成多分类SVM模型, 其结构见图5。将各个频带的能量占比组成样本集 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$, 每两个样本作为一组样本, 作为输入, 根据式(27)分类, 得到每一个二分类SVM模型的分类结果, 最终训练出 $p = C_k^2$ 个SVM二分类模型, 组成一个多分类SVM模型。

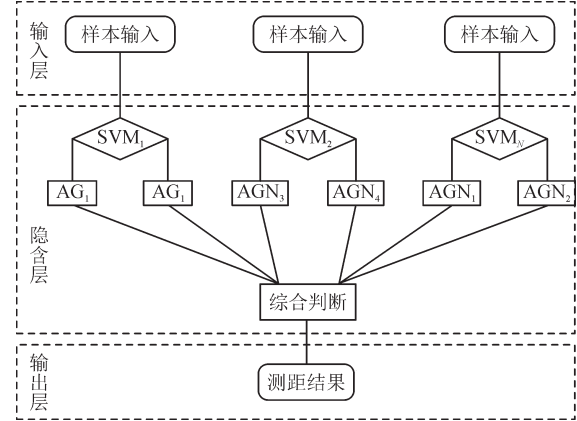


图5 多分类SVM模型

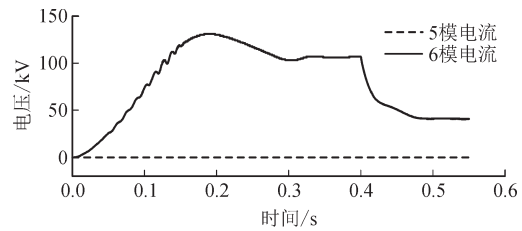
Fig. 5 Multi-class SVM model

3 故障仿真

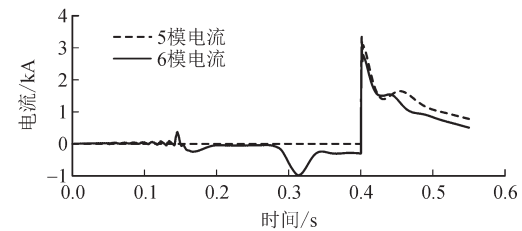
以PSCAD/Emtdc电磁暂态仿真软件为工具, 搭建220 kV的VSC-HVDC系统。电缆仿真模型中, 采用目前具有较高精确性和稳健性的传输线模型为Frequency Dependent(Phase) Model模型。文中仿真模型见图1, 利用PSCAD/Emtdc搭建总长60 km的直流电缆, 并将其分成两段, 以获取电缆不同位置发生不同类型故障时的两端电压电流数据。利用所提的相模解耦矩阵对电压电流进行解耦, 得到模量, 将模量数据导入MATLAB里面, 利用S变换将采集的原始数据进行时频转换。由于系统控制的最短响应时间超过5 ms, 为了防止系统响应引起故障暂态能量频谱的变化, 保证测距结果的准确性, 选择故障后5 ms内的暂态故障数据进行故障测距分析。

3.1 接地短路故障

设置接地短路故障发生在直流电缆的正极, 且单极故障发生在距离VSC-HVDC系统整流侧15 km的直流电缆上, 过渡电阻为20 Ω , 正极接地短路故障波形见图6、7。



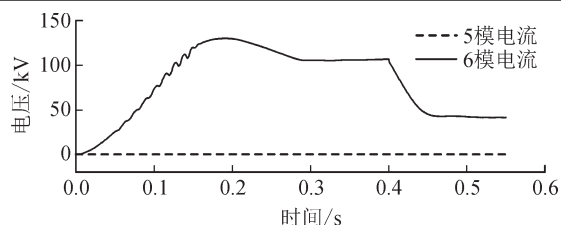
(a) 5、6模电压



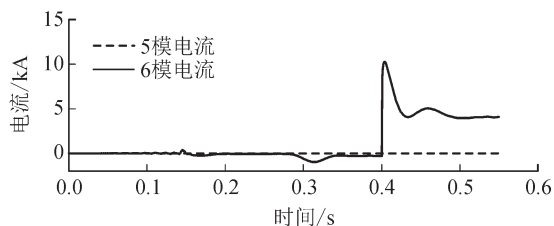
(b) 5、6模电流

图6 整流侧5、6模电压电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of 5 and 6 modes on the rectifier side



(a) 5、6模电压



(b) 5、6模电流

图7 逆变侧5、6模电压电流波形

Fig. 7 Voltage and current waveforms of 5 and 6 modes on the inverter side

以6模量整流侧电流波形为例,对故障后5 ms的5、6模电压电流进行S变换,得到直流电缆故障后5 ms的时频域矩阵,统计不同频率能量幅值见图8。

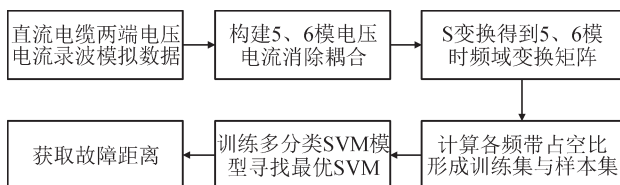
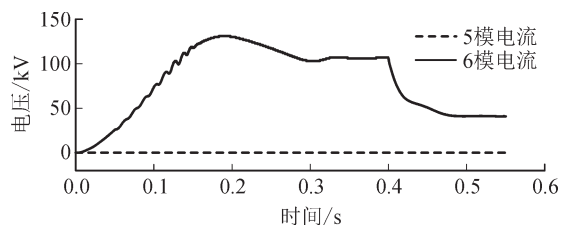


图8 不同频率6模能量幅值

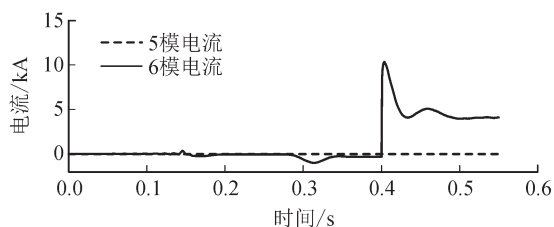
Fig. 8 6 mode energy amplitude at different frequencies

3.2 双极短路故障

当设置直流电缆整流侧15 km发生双极短路故障,过渡电阻为20 Ω ,其故障模量波形如图9、10。



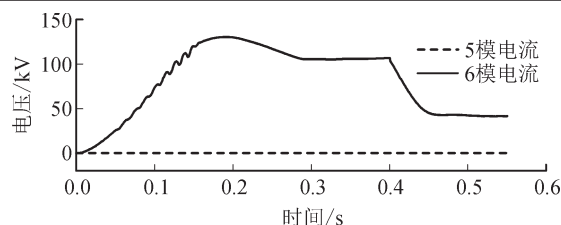
(a) 5、6模电压



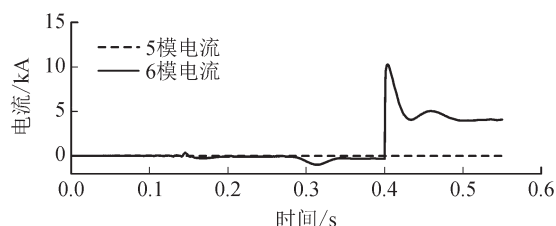
(b) 5、6模电流

图9 整流侧5、6模电压电流波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms of 5 and 6 modes on the rectifier side



(a) 5、6模电压



(b) 5、6模电流

图10 逆变侧5、6模电压电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveforms of 5 and 6 modes on the inverter side

由上述波形可知,发生双极短路故障时,5模电压电流几乎都是0,以此可以对故障类型进行准确判别。

4 测距方法

因为S变换的后得到的频率最大值高达几百 kHz,但直流电缆故障后的能量主要集中在0 Hz和行波主频率附近,超高频的信号能量幅值几乎没有,为了减少所需要训练的SVM模型,将采样时间设为50 μ s,采样频率为20 kHz。由上述分析得故障测距流程见图11。

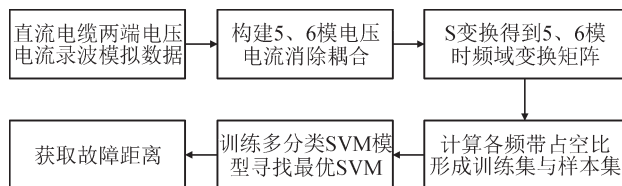


图11 故障测距流程图

Fig. 11 Flow chart of fault location

由图11可知,基于模能量比值故障测距方法主要有以下步骤。

1)采集故障后5 ms内的直流电缆两端电压电流,利用模量计算公式计算出5、6模电压电流,消除直流电缆正负两极间耦合,并以5模量的存在与否进行故障判别。

2)对5、6模电压电流进行S变换,得到直流电缆故障后5 ms的时频域矩阵。

3)利用步骤1)中的5、6模电压电流,计算出故障后5 ms内直流电缆总暂态能量;将0~20 kHz的频率带分为10个不同的频带,因为故障暂态能量较为集中,因此分离的10个频带区间为: $d_0=(0 \text{ Hz}, 100 \text{ Hz})$ 、

$d_1=(100\text{ Hz}, 300\text{ Hz})$ 、 $d_2=(300\text{ Hz}, 600\text{ Hz})$ 、 $d_3=(600\text{ Hz}, 900\text{ Hz})$ 、 $d_4=(900\text{ Hz}, 1.2\text{ kHz})$ 、 $d_5=(1.2\text{ kHz}, 1.5\text{ kHz})$ 、 $d_6=(1.5\text{ kHz}, 1.9\text{ kHz})$ 、 $d_7=(1.9\text{ kHz}, 2.2\text{ kHz})$ 、 $d_8=(2.2\text{ kHz}, 5\text{ kHz})$ 、 $d_9=(5\text{ kHz}, 20\text{ kHz})$ 。

4)将步骤3)得到的占比作为SVM模型的输入,输出为故障距离,利用多分类SVM支持向量机训练,训练学习达到 10^{-3} 的收敛度即停止训练,训练出多分类SVM模型。

5)将测试的故障数据输入训练后的多分类SVM模型实现故障测距。

5 仿真分析

搭建VSC-HVDC系统,直流电缆总长为60 km,分别在直流电缆距离整流端0 km开始,每隔1 km设置一个故障点,最后一个故障点设置在直流电缆末端,过渡电阻取 $\{0.1\ \Omega, 5\ \Omega, 10\ \Omega, 20\ \Omega, 50\ \Omega\}$ 。

将仿真得到的故障后5 ms波形利用MATLAB进行S变换,得到时频域矩阵,计算出 d_1-d_9 幅值,将得到的频带能量幅值除以总暂态能量得到各频带能量在总暂态能量的占比,即做出10个频带能量在总能量中的占比,得到 $E^*=[E_0^*, E_1^*, \dots, E_9^*]$ 。故障样本点组数为305组,为了将SVM模型优化,将291组作为训练样本,另外14组作为测试样本,将291组训练样本 $E^*=[E_0^*, E_1^*, \dots, E_9^*]$ 输入到PSO-SVM模型中训练,设置训练目标误差为0.001,训练迭代次数最高为1 000次,各样本的分布规律见图12。

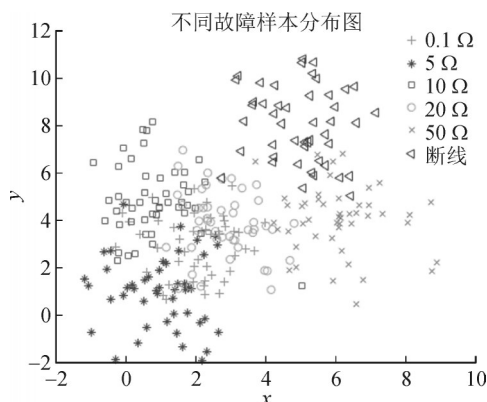


图12 各样本的分布规律图

Fig. 12 Distribution of samples

图12表示不同的接地电阻及断线故障等工况时样本特征分布图。由图可知,对于不同类型接地电阻值接地故障,其特征具有一定的相似性,因此针对不同类型的故障,通过PSO-SVM优化模型可以提高故障测距精度。设置初始惩罚参数为1,核函

数 σ 为1/5,并对SVM进行编码。

在训练PSO算法过程中设置:粒子维度为3维,粒子群大小为20,粒子的初始范围为(0,60),粒子最大速度为0.5,其迭代过程即为寻优的收敛过程,训练收敛曲线见图13。

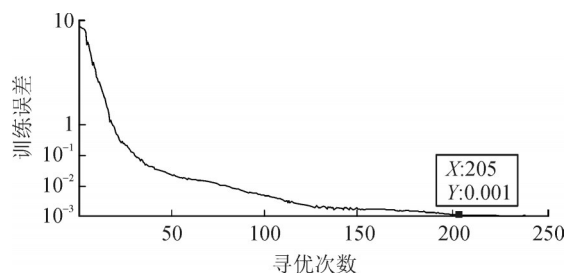


图13 训练收敛曲线图

Fig. 13 Training convergence curve

观察图13可知当寻优次数到达205次时,此时误差 $\xi_{205} = 0.000\ 93 \leq 0.001 \leq \xi_{204} = 0.001\ 24$,可达到收敛要求,此时再对SVM进行解码,通过此过程,即可实现最优故障测距的SVM模型。

最终的测距结果见表1。

表1 直流电缆故障测距结果

Table 1 DC cable fault location results

故障类型	故障距离/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	误差/%
单极故障	0.1	0.1	0.965	1.442
	5.0	5.0	4.961	0.065
	15.0	5.0	14.359	1.068
	25.0	10.0	24.911	0.148
	35.0	10.0	35.552	0.920
	45.0	20.0	44.897	0.172
双极短路故障	60.0	50.0	59.324	1.127
	0.1	0.1	0.834	1.223
	5.0	5.0	5.662	1.103
	15.0	5.0	15.211	0.352
	25.0	10.0	25.494	0.823
	35.0	10.0	35.647	1.078
	45.0	20.0	44.357	1.072
	60.0	50.0	59.239	1.268

由表1可知,文中所提方法从暂态能量的角度出发,得出的测距结果精确度较高,而且几乎不受过渡电阻的影响。

为了验证文中所提方法的准确性和全频域方法的实际工程使用价值,基于该方法对广东某沿海地区电缆故障后数据进行分析,根据故障后0.5 ms录波数据,得出故障5、6模能量,求出故障发生在27.3 km处,见图14,为故障点电缆护层故障图。



图14 故障现场电缆护层故障图

Fig. 14 Fault diagram of cable sheath at fault site

电缆停运后,通过低压脉冲法测得故障发生的28.9 km处,测距误差在1.3%,该方法初步满足测距要求。

6 结论

文中从故障暂态能量的角度出发,提出直流电缆多分类SVM方法,具有以下特点:

1)考虑直流电缆双极运行时的复杂耦合关系,从铠装层,屏蔽层和线芯3层进行相模解耦,消除双极电气量耦合所带来的误差。

2)从模能量的角度出发,利用S变换对模能量进行时频处理,得到故障后5 ms内不同频率的5、6模量在总暂态能量中的占比,保证了故障测距数据的精度和及时性。

3)采用全频域的能量特征进行故障测距,抗干扰性强,但在实际工程运用中,仍有较大改进空间。

参考文献:

- [1] 段玉兵,韩明明,王兆琛,等.不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J].电工技术学报,2024,39(1):45-54.
DUAN Yubing, HAN Mingming, WANG Zhaochen, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high-voltage cables under different thermal aging temperatures [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1):45-54.
- [2] 李忠磊,赵宇彤,韩涛,等.高压电缆半导体屏蔽材料研究进展与展望[J].电工技术学报,2022,37(9):2341-2354.
LI Zhonglei, ZHAO Yutong, HAN Tao, et al. Research progress and prospect of semi-conductive shielding composites for high-voltage cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9):2341-2354.
- [3] 曾祥君,毛宇,邓丰,等.基于多端行波时差的海底观测网故障定位方法[J].电网技术,2019,43(9):3280-3287.
ZENG Xiangjun, MAO Yu, DENG Feng, et al. Fault location method of subsea observation network based on multi-terminal traveling wave time difference[J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3280-3287.
- [4] 魏文青,淡淑恒.基于有限元和神经网络的电缆输送新能源极限能力评估[J].电力科学与技术学报,2023,38(1):191-200.
WEI Wenqing, DAN Shuheng. Evaluation of ultimate capacity of cable transmission new energy based on finite element and neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1):191-200.
- [5] 王祖林,吴宏亮.220 kV大截面XLPE电缆绝缘局部放电在线监测研究[J].大电机技术,2022(6):62-67.
WANG Zulin, WU Hongliang. On-line partial discharge monitoring of 220 kV high voltage large cross-section XLPE insulated cable[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2022(6):62-67.
- [6] 梁贵书,张艺驰.基于分数阶XLPE电缆模型的高频信号传播特性研究[J].高压电器,2020,56(9):172-178.
LIANG Guishu, ZHANG Yichi. Propagation characteristics of the high frequency signal based on fractional-order XLPE cable model[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):172-178.
- [7] MEYER S G, BASSOM A P, READING A M. Delineation of fault segments in mines using seismic source mechanisms and location uncertainty[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019(170):103828.
- [8] 李根,杜志叶,肖湃,等.海上风电送出J型管段海底电缆载流量计算模型研究[J].电工技术学报,2023,38(13):3619-3629.
LI Gen, DU Zhiye, XIAO Pai, et al. Study on calculation model of submarine cable ampacity in J-tube section of offshore wind power transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13):3619-3629.
- [9] 宋冬然,晏嘉琪,夏鄂,等.基于改进麻雀搜索算法的大型海上风电场电缆布置优化[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):134-143.
SONG Dongran, YAN Jiaqi, XIA E, et al. Optimization of cable layout for large-scale offshore wind farms based on an improved sparrow search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12):134-143.
- [10] 张宇飞,罗日成,田迪凯,等.110 kV海底电缆—架空线雷击过电压分析[J].电瓷避雷器,2022(2):14-19.
ZHANG Yufei, LUO Richeng, TIAN Dikai, et al. Lightning overvoltage on 110 kV submarine cable-overhead line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2):14-19.
- [11] 郭强,郝义,王双,等.500 kV充油海底电缆导体温度分布式光纤传感监测及应用[J].智慧电力,2021,49(1):77-82.
GUO Qiang, HAO Yi, WANG Shuang, et al. Monitoring of 500 kV oil-filled submarine cable conductor temperature

- with distributed optical fiber sensing technology and its application[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 77-82.
- [12] 刘卫东, 李奇南, 王 轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
- LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [13] DHOKE A, SHARMA R, SAHA T K. An approach for fault detection and location in solar PV systems[J]. Solar Energy, 2019(194): 197-208.
- [14] 王小君, 任欣玉, 和敬涵, 等. 基于 μ PMU相量信息的配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 810-818.
- WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Fault location method of distribution network based on μ PMU phasor information[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 810-818.
- [15] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. ± 800 kV特高压直流输电线路故障定位小波能量谱神经网络识别法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 141-147.
- LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Wavelet energy spectrum neural network identification method for fault location of 800 kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 141-147.
- [16] 贾 科, 赵其娟, 冯 涛, 等. 柔性直流配电系统高频突变变量距离保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 383-394.
- JIA Ke, ZHAO Qijuan, FENG Tao, et al. Distance protection of high frequency sudden change in flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 383-394.
- [17] 薛士敏, 陆俊弛, 刘 冲, 等. 基于虚拟线路阻抗的MMC-HVDC输电系统单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2868-2875.
- XUE Shimin, LU Junchi, LIU Chong, et al. Single-ended fault location method of MMC-HVDC transmission system based on virtual line impedance[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2868-2875.
- [18] 蒋 鹏, 周聪明, 张 磊, 等. 基于电流模量分析的MMC-MTDC系统直流输电线路故障识别[J]. 南方电网技术, 2019, 13(7): 51-57.
- JIANG Peng, ZHOU Congming, ZHANG Lei, et al. Fault identification of DC transmission lines in MMC-MTDC system based on current modulus analysis[J]. Southern Power Grid Technology, 2019, 13(7): 51-57.
- [19] 杨亚超, 黄 纯, 汪星耀, 等. 一种直流配电网线路故障测距新方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1787-1794.
- YANG Yachao, HUANG Chun, WANG Xingyao, et al. A novel line fault location method for DC distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1787-1794.
- [20] 田闽哲, 张 龙, 罗辉勇, 等. 特高压直流输电线路雷击暂态响应监测技术研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(3): 93-98.
- TIAN Minzhe, ZHANG Long, LUO Huiyong, et al. Research on lightning transient response monitoring system of UHV DC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(3): 93-98.
- [21] 侯俊杰, 樊艳芳. 基于分布参数模型的风电系统长距离送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 26-33.
- HOU Junjie, FAN Yanfang. Time-domain distance protection of long-distance transmission line of wind power system based on distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 26-33.
- [22] 贾 科, 董雄鹰, 李 论, 等. 基于稀疏电压幅值量测的配电网故障测距[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 835-845.
- JIA Ke, DONG Xiongying, LI Lun, et al. Distribution network fault location based on sparse voltage amplitude measurement[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 835-845.
- [23] 赵冠琨, 贾 科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
- ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [24] 刘云鹏, 步雅楠, 贺 鹏, 等. 基于S变换和ELM的变压器绕组应变检测识别[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 9-17.
- LIU Yunpeng, BU Yanan, HE Peng, et al. Transformer winding strain detection identification based on S-transform and ELM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 9-17.
- [25] 张 欣, 张 静, 高 旭, 等. 采用局部时频-频奇异值与优化随机森林的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 225-231.
- ZHANG Xin, ZHANG Jing, GAO Xu, et al. High voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis with local time-frequency singular value and the optimal random forest[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 225-231.

夏向阳(1968—),男,博士,教授,博导,主要从事柔性直流输电、电力电缆故障诊断等方面研究(通信作者)(E-mail: 307651045@qq.com)。

刘奕琰(1998—),女,硕士,助理工程师,主要从事电力电缆故障诊断及故障测距等方面研究。