

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211115

# 基于 VMD 能量熵的混合双端直流输电线路纵联保护方案

高淑萍<sup>1</sup>, 宋晓辰<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为提高混合双端高压直流输电线路故障快速清除能力, 确保输电系统安全运行, 提出了一种基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)能量熵的混合双端直流输电线路纵联保护方法。根据高压直流输电线路边界元件两侧的电压能量不同, 同时考虑故障类型以及过渡电阻的影响, 构造了电压故障分量的能量熵保护方案。将故障时测量点采集的电压故障分量进行 VMD 分解, 得到若干固有模态分量并计算能量熵。根据区内外故障时电压故障分量的能量熵大小不同构造区内外故障判据, 由正负极电压故障分量的能量熵之比构造故障极判据。通过 PSCAD/EMTDC 建模仿真, 并利用 Matlab 结合保护判据对该方法进行验证。结果表明, 该保护方法快速性好、可靠性高、耐过渡电阻能力强。

**关键词:** 混合双端直流输电系统; 继电保护; 故障; 变分模态分解; 能量熵

## Longitudinal protection scheme of hybrid double-terminal DC transmission lines based on VMD energy entropy

GAO Shuping<sup>1</sup>, SONG Xiaochen<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To improve the quick fault clearing ability of hybrid dual-terminal HVDC transmission lines and ensure the safe operation of the transmission system, a hybrid dual-terminal HVDC transmission line longitudinal protection method based on variational mode decomposition energy entropy is proposed. Given the different voltage energy on both sides of HVDC boundary elements, and considering the fault types and the influence of transition resistance, a protection scheme of energy entropy of the voltage fault component is constructed. The voltage fault components are collected at measurement points when faults are decomposed by VMD to obtain some inherent modal components and calculate the energy entropy. The fault criteria are constructed according to the values of energy entropy of the voltage fault components in and out of the zone, and a fault pole criterion is constructed according to the ratio of the energy entropy of the components in and out of the zone. The method is verified using PSCAD/EMTDC modeling and simulation, Matlab and protection criteria. The results show that the protection method is fast, and has high reliability and strong resistance to transition resistance.

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

**Key words:** hybrid double-ended DC transmission system; relay protection; fault; variational mode decomposition; energy entropy

## 0 引言

高压直流输电系统由于其传输容量大且损耗小的优点, 广泛应用于远距离、大容量输电<sup>[1-3]</sup>。电网换相型换流器高压直流输电系统(Line Commutated

Converter based High Voltage Direct Current, LCC HVDC)存在逆变站易发生换相失败、无功功率消耗大等缺点。模块化多电平换流器高压直流输电系统(Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC HVDC)不存在换相失败问题, 且有有功功率和无功功率能独立控制。结合 LCC 和 MMC 两者优点, 整流站采用 LCC、逆变站采用 MMC 的混合型高压直流输电成为当前研究热点<sup>[4]</sup>。然而基于半桥子模块(Half Bridge Sub-module, HBSM)

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(51777166); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目资助(U1766209); 中国国家留学基金项目资助

的 MMC 无法像 LCC 那样单纯依靠换流器控制策略来完成直流侧故障穿越。基于全桥子模块(Full Bridge Sub-module, FBSM)的 MMC 虽可以通过调制运行实现直流故障穿越,提高直流电压利用率,但与同容量和同电压等级的半桥 MMC 相比,全桥 MMC 使用的电力电子器件较多,不仅增加了投资成本,而且引入更多的运行损耗。因此,将两种子模块混合使用,形成混合 MMC,可以充分发挥各自优势,具有良好的经济性和故障穿越能力,使 LCC-MMC 混合高压直流输电结构在远距离输电场合有更好的工程应用前景<sup>[5-7]</sup>。

由于直流输电系统输电线路较长,发生故障的几率较高。故障发生后,如何快速稳定可靠地识别故障并使继电保护装置动作,成为直流输电亟待解决的问题。近些年来,针对高压直流输电线路保护,国内外学者做了大量的研究:文献[8]提出了一种采用补偿电流的高压直流输电线路保护方法,通过基于分布参数模型的 HVDC 输电线路区内外故障时不平衡电流不同,确定保护整定判据。文献[9-10]利用边界元件对高频信号的阻滞性,分析单端暂态电气量信号,通过边界元件阻抗幅频特性,构建区内外故障识别判据。文献[11]提出一种基于小波多频带能量的 HVDC 线路单端暂态电流保护方案。利用低频带能量、高频带和低频带能量比来区分区内外故障、故障性雷击和非故障性雷击,利用正极和负极的能量比确定故障极。文献[12]根据平波电抗器两侧有功功率故障分量暂态能量的不同,利用小波包对有功功率故障分量分解,整定保护判据,即可区分区内外故障和故障极。文献[13]提出了一种基于经验模态分解与斯皮尔曼相关系数的混合直流线路纵联保护方法,通过 EMD 提取故障信号残余函数,计算残余函数的 Spearman 相关系数,识别区内外故障。文献[14]利用改进局部均值分解方法提取故障分量,根据线路区内外故障时故障电压分量

瞬时能量差值的不同特征,提出一种基于改进 LMD 分解的直流线路暂态保护方法。

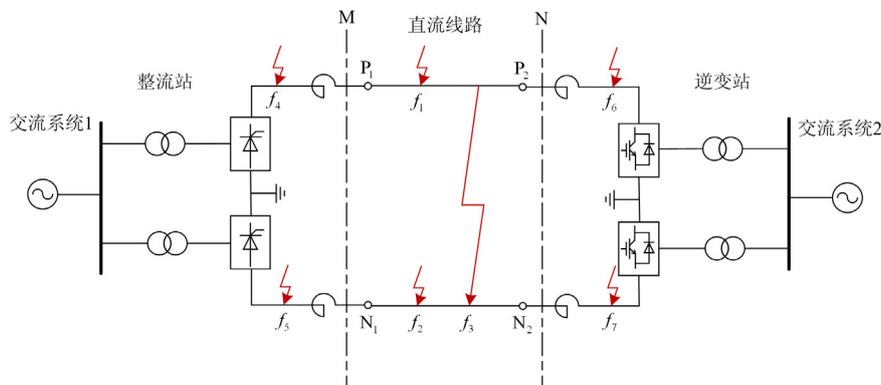
VMD 算法是 2014 年 Dragomiretskiy 等人提出的一种新型信号分解方法,早期 VMD 算法用于机械故障诊断<sup>[15-16]</sup>,近年来在电力系统中,该分解方法已在变压器故障诊断<sup>[17-18]</sup>和高压直流输电线路故障测距<sup>[19-21]</sup>中应用,但在高压直流输电线路保护中应用较少。文献[22]利用 VMD 良好频带划分能力,将信号划分为不同频率的模态分量,可以将其应用到谐波信号的检测当中。该算法具有良好的噪声鲁棒性和较高的检测精度,可同时适用于稳态谐波与暂态谐波的检测。

本文提出一种基于 VMD 能量熵的纵联保护方法,利用 VMD 分解故障电压信号,根据直流线路区内外故障时电压故障分量的 VMD 能量熵不同,区分区内外故障,根据直流线路区内故障时正负极电压故障分量的能量熵之比不同区分故障极。本文搭建±500 kV 混合双端直流输电系统的模型,通过大量仿真试验验证本保护方法的正确性。

### 1 混合双端直流输电系统拓扑结构

本文搭建了直流电压等级为±500 kV 混合双端直流输电系统模型,整流侧采用 LCC 型换流器,逆变侧采用 MMC 型换流器,每个换流器由 50%全桥子模块和 50%半桥子模块混合级联而成,如图 1(b)所示。其中整流侧的换流器采用定直流电流控制,逆变侧的换流器采用定直流电压和定无功功率控制。

系统拓扑结构以及所设故障位置如图 1(a)所示。M 侧为整流侧;N 侧为逆变侧;P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 为正极两侧换流站的保护安装点;N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 为负极两侧换流站的保护安装点;f<sub>1</sub> 为区内正极接地故障;f<sub>2</sub> 为区内负极接地故障;f<sub>3</sub> 为区内双极短路接地故障;f<sub>4</sub>—f<sub>7</sub> 为换流站直流线路出口处的区外故障。



(a) 系统拓扑结构

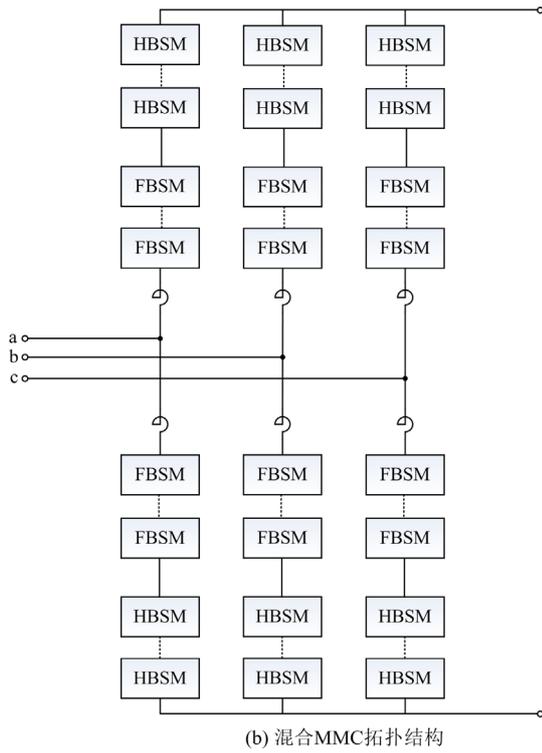


图 1 混合高压直流输电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of hybrid HVDC transmission system

## 2 直流输电线路故障特性分析

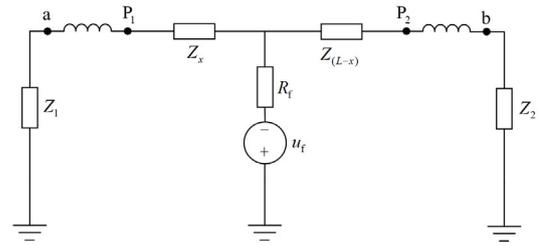
### 2.1 边界保护

在本次搭建的直流线路中，平波电抗器可以作为天然物理边界，将混合双端线路保护分成区内和区外两个部分，边界元件对暂态电压信号的变化有衰减作用。平波电抗器主要参数为电感值，电感值取值越大，对高频分量抑制效果越好，但太大会引起过电压，系统自动调节性能也将变差<sup>[23]</sup>。在本文采用的模型中，经大量仿真实验，电感值最小取值为 100 mH，当电感值小于 100 mH 时，虽然边界可以区分，但直流电流纹波难以抑制。本文中电感值取 300 mH。当平波电抗器取 300 mH 时，可抑制直流纹波，且边界效应明显。

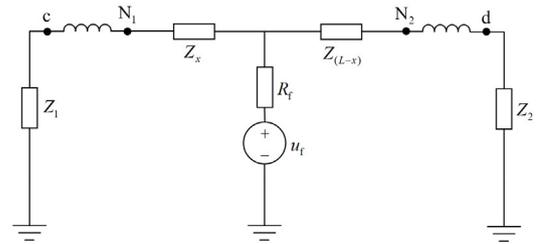
### 2.2 区内故障特性分析

当直流线路故障时，电力系统可以等效为故障前的正常运行系统和故障附加状态的叠加，下面对各种故障状态进行分析。当故障发生在区内时，以故障  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  为例分析故障附加网络图，如图 2 所示。

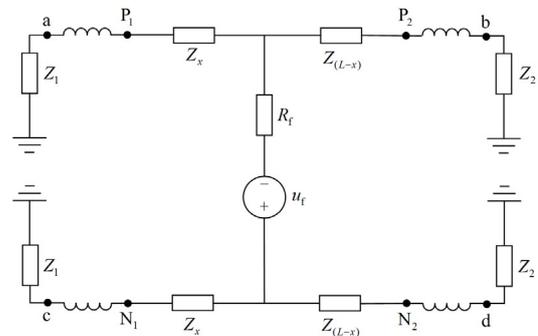
图 2 中， $u_f$  为故障附加电源， $R_f$  为故障点的过渡电阻， $P_1$ 、 $P_2$  为正极保护测量安装处， $N_1$ 、 $N_2$  为负极保护测量安装处，a、b 分别为正极整流侧和逆



(a) 区内正极故障网络附加图



(b) 区内负极故障网络附加图



(c) 区内双极故障网络附加图

图 2 区内故障网络附加图

Fig. 2 Additional diagram of inner area fault network

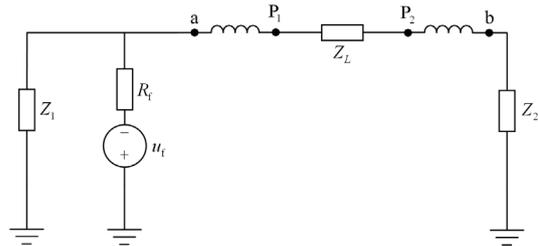


图 3 区外故障网络附加图

Fig. 3 Additional diagram of out-of-area fault network

变侧边界元件外侧，c、d 分别为负极整流侧和逆变侧边界元件外侧， $Z_1$ 、 $Z_2$  为系统两端交流侧等效电阻， $Z_L$  为直流输电线路阻抗， $Z_x$  为直流输电线路阻抗，假设在距整流侧  $x$  km 处发生故障，则  $Z_x$  为整流侧到  $x$  km 处的线路阻抗， $Z_{(L-x)}$  为  $x$  km 处到逆变侧的线路阻抗。定义  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  处测量的电压分别为  $U_{P_1}$ 、 $U_{P_2}$ 、 $U_{N_1}$ 、 $U_{N_2}$ 。

图 2(a)中,当直流线路发生区内正极故障时,相当于在故障点叠加了一个负电源,  $U_{P_1}$ 、 $U_{P_2}$  会急速下降,此时  $P_1$ 、 $P_2$  处电压故障分量的暂态能量变化较大,由于线路的耦合作用,负极线路  $U_{N_1}$ 、 $U_{N_2}$  也会下降,但变化微小,此时  $N_1$ 、 $N_2$  处电压故障分量的暂态能量变化较小。

图 2(b)中,当直流线路发生区内负极故障时,相当于在故障点叠加了一个正电源,  $U_{N_1}$ 、 $U_{N_2}$  会急速上升,此时  $N_1$ 、 $N_2$  处电压故障分量的瞬时能量变化较大,由于线路的耦合作用,正极线路  $U_{P_1}$ 、 $U_{P_2}$  也会上升,但变化微小,此时  $P_1$ 、 $P_2$  处电压故障分量的暂态能量变化较小。

图 2(c)中,当直流线路发生区内双极故障时,相当于在正极线路与负极线路之间叠加了一个负电源,  $U_{P_1}$ 、 $U_{P_2}$  会急速上升,  $U_{N_1}$ 、 $U_{N_2}$  会急速下降,此时  $P_1$ 、 $P_2$  和  $N_1$ 、 $N_2$  处电压故障分量的暂态能量变化都较大。

### 2.3 区外故障特性分析

当故障发生在区外时,以故障  $f_4$  为例分析故障附加网络图,如图 3 所示。由于有平波电抗器作为边界保护,当发生故障时,平波电抗器会抑制故障电压的变化。可知当发生区内故障  $f_1$  时,由于平波电抗器的作用,  $P_1$  处的电压故障分量远大于 a 处的电压故障分量,即  $P_1$  处电压故障分量的暂态能量远大于 a 处电压故障分量的暂态能量。当发生区外故障  $f_4$  时,由于平波电抗器的作用, a 处的电压故障分量远大于  $P_1$  处电压故障分量,即 a 处电压故障分量的暂态能量远大于  $P_1$  处电压故障分量的暂态能量。其他区外故障与之类似,不再赘述。

由此可知,当发生区外故障时,由于有边界元件的存在,保护测量安装处得到的电压故障分量变化较小,电压故障分量的暂态能量较小。

## 3 相关理论和算法

### 3.1 变分模态分解

变分模态分解(VMD)是一种自适应、完全非递归的模态变分和信号处理的方法<sup>[24]</sup>,其利用循环迭代求取约束变分问题的最优解,根据实际情况确定模态分解个数。随后在搜索和求解过程中自适应匹配每种模态的最佳中心频率和有限带宽,进而把原始信号分解为一系列不同频率的固有模态分量,实现固有模态分量的有效分离、信号的频域划分,进而得到给定信号的有效分解成分,最终获得变分问题的最优解。

该算法利用维纳滤波构造了原始信号  $f(t)$  的变分问题,将原始信号分解成  $K$  个本征模态 IMF 分量,保证分解序列为具有中心频率和有限带宽的 IMF 分量。构造的约束性变分表达式为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K$  为模态分量个数;  $u_k$  为变分模态分解到的第  $k$  个 IMF 分量;  $\omega_k$  为第  $k$  个 IMF 分量的中心频率;  $\delta(t)$  为单位脉冲函数;  $f$  为原始信号。

通过引入二次惩罚函数和拉格朗日乘法算子求解上述变分问题。二次惩罚函数  $\alpha$  保证了信号在高斯噪声干扰下的精确分解,拉格朗日乘数  $\lambda(t)$  保证了约束条件的严格性。这种方法将约束性变分问题转化为非约束性变分问题,利于求得最优解。扩展的拉格朗日函数  $L$  可表示为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \left[ \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right] \quad (2)$$

采用交替方向乘子迭代算法求搜寻式(2)扩展拉格朗日函数的鞍点,解决变分问题,通过不断更新各 IMF 分量及其中心频率,求取约束变分模型的最优解。 $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 、 $\omega_k^{n+1}$ 、 $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega)$  的更新具体如下:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[ \hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (5)$$

式中,  $\tau$  为噪声容限参数。

变分模态分解具体实现过程如下:

- 1) 初始化  $u_k^1$ 、 $\omega_k^1$ 、 $\lambda^1$  和  $n$ , 都设为 0;
- 2)  $n = n + 1$ , 执行整个循环;
- 3) 执行第一个内层循环,根据式(3)对  $u_k$  进行更新;
- 4)  $k = k + 1$  重复步骤 3), 直至  $k = K$ , 结束第一个内层循环;

5) 执行第二个内层循环, 根据式(4)对  $\omega_k$  进行更新;

6)  $k = k + 1$  重复步骤 5), 直至  $k = K$ , 结束第二个内层循环;

7) 根据式(5)更新  $\lambda$ ;

8) 重复步骤 2)~步骤 7), 直至满足式(6), 其中判定精度  $\varepsilon > 0$ , 迭代停止, 结束整个循环。

$$\frac{\sum_{k=1}^K \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2}{\|\hat{u}_k^n\|_2^2} < \varepsilon \quad (6)$$

### 3.2 算法参数设置

本文采用的 VMD 分解算法需预先设置分解模态数  $K$  和二次惩罚因子  $\alpha$ 。当  $K$  取值过大会出现过分解现象时, 淹没故障信息; 当  $K$  取值过小时, 极值点位置发生偏移, 结果的误差较大。当  $\alpha$  取值很大时, 模态极值变小, 可能被噪声干扰淹没故障信息; 当  $\alpha$  取值很小时, 极值点的位置和个数发生偏移, 结果误差较大。通过大量仿真实验, 当本文取  $K = 4$  和  $\alpha = 5000$  时, VMD 分解效果最优。

### 3.3 VMD 能量熵

信息熵是对系统不确定性的度量化, 即信号输出的信息越多, 则不确定性越大, 得到的熵值越大。反之, 信号输出的信息越少, 则不确定性越小, 得到的熵值越小。将信息熵运用在直流输电系统中, 当故障电压分量变化越大时, 得到的暂态能量越多, 其能量熵值越大, 当故障电压分量变化越小时, 得到的暂态能量越少, 其能量熵值越小。

VMD 分解得到的各 IMF 分量包含了不同频段的信息, 当直流线路发生故障时, IMF 分量必然产生变化, 进而导致暂态能量发生变化, 因此可以根据各 IMF 分量的变化, 通过计算各 IMF 分量的能量熵值, 提取高压直流线路的故障特征。假设原始故障信号经过 VMD 分解得到  $K$  个 IMF 分量, 各 IMF 分量依次用  $u_1, u_2, \dots, u_k$  表示, 各模态分量的能量依次用  $E_1, E_2, \dots, E_k$  表示。各 IMF 分量的能量定义为

$$E_i = \int_{-\infty}^{+\infty} |u_i(t)|^2 dt \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

因为各 IMF 分量包含了不同频率的故障信息, 故  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_k\}$  构成能量特征在频率域上的一种分布。根据熵的定义, VMD 能量熵定义为

$$H = -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i \quad (8)$$

式中,  $p_i$  表示第  $i$  个信息分量能量的比重概率,  $p_i = E_i / E$ 。

由于边界元件的抑制作用, 当直流线路发生区内故障时, 保护测量安装处电压故障分量的暂态能量较大, 当直流线路发生区外故障时, 保护测量安装处电压故障分量的暂态能量较小, 其 VMD 能量熵值不同, 所以可利用计算 VMD 能量熵的办法来识别区内外故障状态。

## 4 基于 VMD 能量熵的保护方法

### 4.1 保护启动

直流线路故障时, 提取保护安装处的电压故障分量幅值, 构造出保护启动判据。

$$|\Delta U| > 0.1 U_n \quad (9)$$

式中:  $|\Delta U|$  为保护安装处得到的电压故障分量的幅值;  $U_n$  为电压额定值。在故障发生瞬间, 电压故障分量发生突变, 若保护安装处测量的电压满足式(9), 则保护启动, 否则保护不启动。

### 4.2 保护判据

#### 4.2.1 区内外故障识别判据

当直流输电线路确定发生故障时, 应首先判断故障发生在区内还是区外。通过 2.3 节分析可知, 直流线路发生区内故障时, 保护测量点得到的电压故障分量的暂态能量较大, VMD 能量熵值较大, 当发生区外故障时, 保护测量点得到的电压故障分量的暂态能量较小, VMD 能量熵值较小。由此, 构造区内外故障识别判据。

$$K_1 > H_{set} \quad (10)$$

式中,  $K_1$  为保护安装处得到的 VMD 能量熵, 并且  $K_1$  取同侧保护安装处的能量熵最大值;  $H_{set}$  为保护设定的门槛值。为可靠区分区内外故障, 针对最严重的故障情况选取  $H_{set}$ , 需要保证其门槛值  $H_{set}$  可以躲开所有区外故障。根据大量仿真实验可知, 当故障发生在区内和区外时, VMD 能量熵差异较大, 因此在一定阈值的情况下, 即  $H_{set}$  取为 0.01 时, 可以明显区分区内外故障。若满足式(10), 判定此故障为区内故障, 否则判定此故障为区外故障, 保护不动作。

#### 4.2.2 故障极识别判据

当直流线路发生区内故障时, 需进一步识别故障是发生在正极、负极或者双极线路, 即需要判别故障极。当直流线路发生区内正极故障时, 正极保护测量安装处的电压故障分量的能量熵远大于负极保护测量安装处, 当直流线路发生区内负极故障时, 负极保护测量安装处的电压故障分量的能量熵远大于正极保护测量安装处, 当直流线路发生区内双极故障时, 正极保护测量安装处的电压故障分量的能量熵与负极保护测量安装处的大小相近。

可以根据逆变站两极  $P_2$ 、 $N_2$  处电压故障分量的能量熵比值不同, 构造故障级识别判据。

$$K_2 = H_p / H_n \quad (11)$$

式中,  $H_p$  和  $H_n$  分别为逆变侧正极和负极利用 VMD 算法得到的能量熵。由此可知, 当发生正极故障时,  $K_2$  较大; 当发生负极故障时,  $K_2$  较小; 当发生双极故障时,  $K_2$  约为 1。

最终, 构造的保护判据如下。

区外故障:  $K_1 < 0.01$

区内正极故障:  $K_1 > 0.01$  &  $K_2 > 1.2$

区内负极故障:  $K_1 > 0.01$  &  $K_2 < 0.8$

区内双极故障:  $K_1 > 0.01$  &  $0.8 < K_2 < 1.2$

### 4.3 保护流程

图 4 为保护方法流程图, 先判断是否发生故障, 当保护启动时, 对测量得到的数据进行 VMD 分解, 求取能量熵, 对比正负极能量熵大小, 从而判别区内外故障, 以及故障选极。

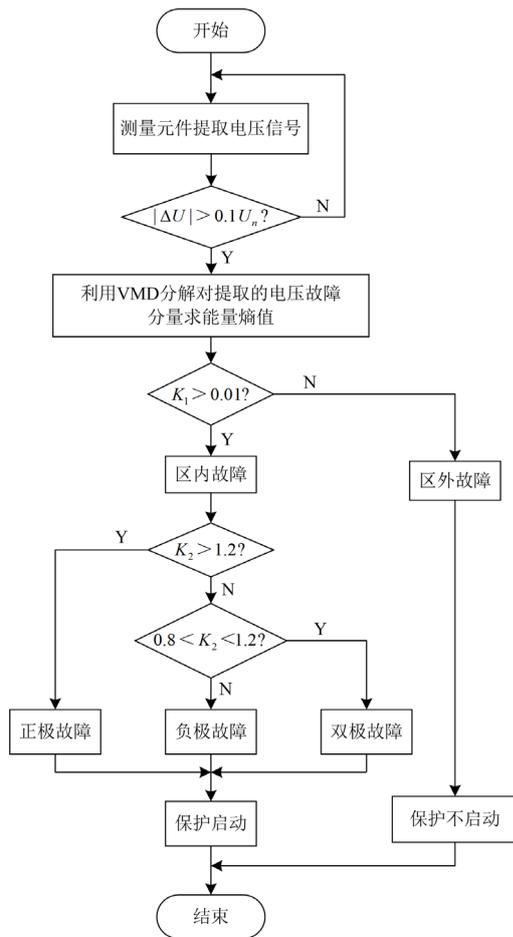


图 4 保护方法流程图

Fig. 4 Flow chart of protection method

## 5 仿真验证与分析

本文搭建的混合双端直流模型输电线路长度为 800 km, 仿真时长 2 s, 在 1 s 时设置故障, 故障持续时间为 0.1 s, 故障采样窗口设为 3 ms, 采样频率设为 10 kHz。

### 5.1 区内外故障仿真

#### 5.1.1 金属性接地故障

当判别区内外故障时, 保护判据应按照区内高阻接地故障躲过最严重的区外故障来判定, 金属性接地故障属于最严重的故障类型, 若保护能躲过区外金属性接地故障, 则可以保证能躲过其他区外故障。为模拟金属性故障, 过渡电阻取 0.01 Ω, 针对故障  $f_1$ — $f_7$  的不同故障位置 and 不同过渡电阻进行仿真实验。

当过渡电阻为 0.01 Ω 时, 在不同故障类型和不同故障位置下, 测量点得到的能量熵值如表 1 所示。

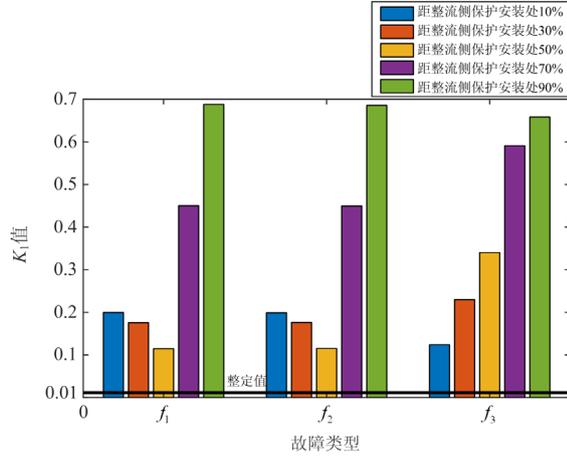
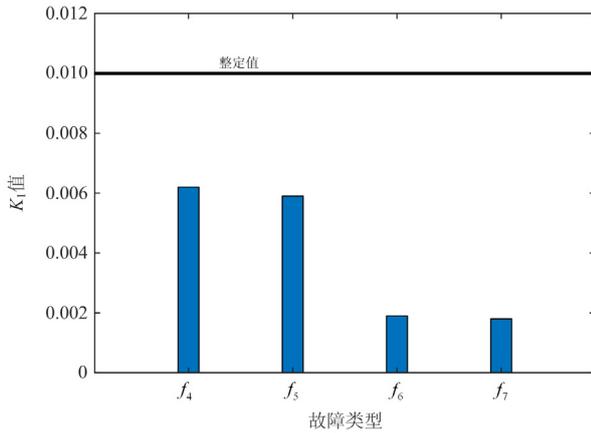
表 1 区内外金属性短路故障识别结果

Table 1 Identification result of metallic short circuit

| fault inside and outside zone |               |        |         |
|-------------------------------|---------------|--------|---------|
| 故障类型                          | 故障位置          | $K_1$  | 区内外判定结果 |
| $f_1$                         | 距整流侧保护安装处 10% | 0.1996 | 区内      |
|                               | 距整流侧保护安装处 30% | 0.1754 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 50% | 0.1146 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 70% | 0.4501 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 90% | 0.6877 |         |
| $f_2$                         | 距整流侧保护安装处 10% | 0.1990 | 区内      |
|                               | 距整流侧保护安装处 30% | 0.1763 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 50% | 0.1151 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 70% | 0.4495 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 90% | 0.6854 |         |
| $f_3$                         | 距整流侧保护安装处 10% | 0.1239 | 区内      |
|                               | 距整流侧保护安装处 30% | 0.2297 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 50% | 0.3403 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 70% | 0.5909 |         |
|                               | 距整流侧保护安装处 90% | 0.6580 |         |
| $f_4$                         | 整流侧换流器出口      | 0.0062 | 区外      |
| $f_5$                         | 整流侧换流器出口      | 0.0059 | 区外      |
| $f_6$                         | 逆变侧换流器出口      | 0.0019 | 区外      |
| $f_7$                         | 逆变侧换流器出口      | 0.0018 | 区外      |

当发生金属性故障时, 区内外故障得到的能量熵值大小如图 5 所示, 由图 5 可知, 区内故障  $f_1$ 、

$f_2$ 、 $f_3$  在过渡电阻为  $0.01 \Omega$  和不同位置得到的能量熵值均大于整定值  $H_{set} = 0.01$ 。区外故障  $f_4 - f_7$  在不同位置得到的能量熵值均小于  $H_{set} = 0.01$ , 区内外故障保护判据得到了有效证明。

(a) 区内金属性故障的  $K_1$  值(b) 区外金属性故障的  $K_1$  值图 5 区内外金属性故障时的  $K_1$  值Fig. 5  $K_1$  value when the internal and external metallic fault

### 5.1.2 高阻接地故障

由于过渡电阻的影响, 过渡电阻越大, 电压故障分量越小, 得到的能量熵值越小。为证明在区内高阻接地故障时, 保护仍可以启动, 针对故障  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  在不同故障位置 and 不同过渡电阻下, 进行仿真实验。

过渡电阻为  $100 \Omega$ 、 $300 \Omega$ 、 $500 \Omega$  时, 在不同故障类型和不同故障位置下, 测量点得到的能量熵值如表 2 所示。

由表 2 可知, 区内故障  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  在不同位置 and 不同过渡电阻下得到的能量熵值均大于整定值  $H_{set} = 0.01$ 。当发生区内高阻接地故障时, 保护判据正确。

### 5.2 故障选极

在发生区内故障时, 需要进一步识别故障极, 对于故障  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  在不同故障位置 and 不同过渡电阻下, 正负极能量熵之比  $K_2$  如表 3 所示。

表 2 区内高阻接地故障识别结果

Table 2 Identification results of internal high resistance ground fault

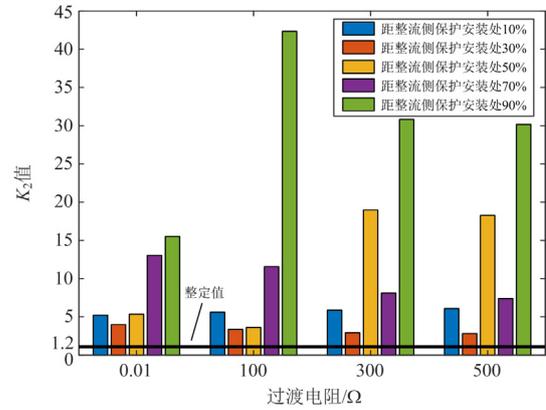
| 故障类型  | 故障位置          | 过渡电阻 | $K_1$  |
|-------|---------------|------|--------|
| $f_1$ | 距整流侧保护安装处 10% | 100  | 0.0872 |
|       |               | 300  | 0.0323 |
|       |               | 500  | 0.0170 |
|       | 距整流侧保护安装处 30% | 100  | 0.0626 |
|       |               | 300  | 0.0198 |
|       |               | 500  | 0.0128 |
|       | 距整流侧保护安装处 50% | 100  | 0.0324 |
|       |               | 300  | 0.0683 |
|       |               | 500  | 0.0347 |
|       | 距整流侧保护安装处 70% | 100  | 0.1492 |
|       |               | 300  | 0.0340 |
|       |               | 500  | 0.0155 |
|       | 距整流侧保护安装处 90% | 100  | 0.3640 |
|       |               | 300  | 0.0740 |
|       |               | 500  | 0.0362 |
| $f_2$ | 距整流侧保护安装处 10% | 100  | 0.0870 |
|       |               | 300  | 0.0322 |
|       |               | 500  | 0.0170 |
|       | 距整流侧保护安装处 30% | 100  | 0.0631 |
|       |               | 300  | 0.0200 |
|       |               | 500  | 0.0190 |
|       | 距整流侧保护安装处 50% | 100  | 0.0329 |
|       |               | 300  | 0.0694 |
|       |               | 500  | 0.0352 |
|       | 距整流侧保护安装处 70% | 100  | 0.1495 |
|       |               | 300  | 0.0340 |
|       |               | 500  | 0.0155 |
|       | 距整流侧保护安装处 90% | 100  | 0.3643 |
|       |               | 300  | 0.0737 |
|       |               | 500  | 0.0356 |
| $f_3$ | 距整流侧保护安装处 10% | 100  | 0.0623 |
|       |               | 300  | 0.0255 |
|       |               | 500  | 0.0140 |
|       | 距整流侧保护安装处 30% | 100  | 0.1046 |
|       |               | 300  | 0.0386 |
|       |               | 500  | 0.0203 |
|       | 距整流侧保护安装处 50% | 100  | 0.1384 |
|       |               | 300  | 0.0461 |
|       |               | 500  | 0.0232 |
|       | 距整流侧保护安装处 70% | 100  | 0.2786 |
|       |               | 300  | 0.0970 |
|       |               | 500  | 0.0485 |
|       | 距整流侧保护安装处 90% | 100  | 0.9325 |
|       |               | 300  | 0.1984 |
|       |               | 500  | 0.0845 |

表 3 故障极识别结果

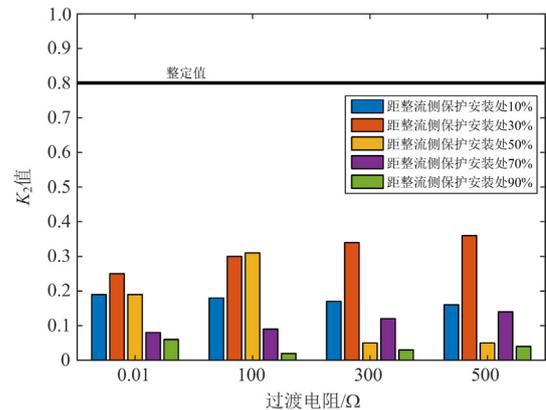
Table 3 Identification results of fault poles

| 故障类型              | 故障位置              | 过渡电阻 | $K_2$ | 故障极判定结果 |
|-------------------|-------------------|------|-------|---------|
| $f_1$             | 距整流侧保护<br>安装处 10% | 0.01 | 5.21  | 正极      |
|                   |                   | 100  | 5.59  |         |
|                   |                   | 300  | 5.87  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 30% | 500  | 6.07  |         |
|                   |                   | 0.01 | 3.98  |         |
|                   |                   | 100  | 3.35  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 50% | 300  | 2.91  |         |
|                   |                   | 500  | 2.80  |         |
|                   |                   | 0.01 | 5.33  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 70% | 100  | 3.60  |         |
|                   |                   | 300  | 18.97 |         |
|                   |                   | 500  | 18.26 |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 90% | 0.01 | 13.05 |         |
|                   |                   | 100  | 11.57 |         |
|                   |                   | 300  | 8.10  |         |
| $f_2$             | 距整流侧保护<br>安装处 10% | 500  | 7.38  | 负极      |
|                   |                   | 0.01 | 15.52 |         |
|                   |                   | 100  | 42.33 |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 30% | 300  | 30.83 |         |
|                   |                   | 500  | 30.17 |         |
|                   |                   | 0.01 | 0.19  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 50% | 100  | 0.18  |         |
|                   |                   | 300  | 0.17  |         |
|                   |                   | 500  | 0.16  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 70% | 0.01 | 0.25  |         |
|                   |                   | 100  | 0.30  |         |
|                   |                   | 300  | 0.34  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 90% | 500  | 0.36  |         |
|                   |                   | 0.01 | 0.19  |         |
|                   |                   | 100  | 0.31  |         |
| $f_3$             | 距整流侧保护<br>安装处 10% | 300  | 0.05  | 双极      |
|                   |                   | 500  | 0.05  |         |
|                   |                   | 0.01 | 0.08  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 30% | 100  | 0.09  |         |
|                   |                   | 300  | 0.12  |         |
|                   |                   | 500  | 0.14  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 50% | 0.01 | 0.06  |         |
|                   |                   | 100  | 0.02  |         |
|                   |                   | 300  | 0.03  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 70% | 500  | 0.04  |         |
|                   |                   | 0.01 | 0.99  |         |
|                   |                   | 100  | 0.99  |         |
|                   | 距整流侧保护<br>安装处 90% | 300  | 1.00  |         |
|                   |                   | 500  | 1.00  |         |
|                   |                   | 0.01 | 0.99  |         |
| 距整流侧保护<br>安装处 10% | 100               | 0.99 |       |         |
|                   | 300               | 0.99 |       |         |
|                   | 500               | 0.99 |       |         |
| 距整流侧保护<br>安装处 30% | 0.01              | 1.00 |       |         |
|                   | 100               | 1.00 |       |         |
|                   | 300               | 0.99 |       |         |
| 距整流侧保护<br>安装处 50% | 500               | 1.00 |       |         |
|                   | 0.01              | 1.00 |       |         |
|                   | 100               | 0.99 |       |         |
| 距整流侧保护<br>安装处 70% | 300               | 0.99 |       |         |
|                   | 500               | 1.00 |       |         |
|                   | 0.01              | 1.00 |       |         |
| 距整流侧保护<br>安装处 90% | 100               | 0.99 |       |         |
|                   | 300               | 1.01 |       |         |
|                   | 500               | 0.99 |       |         |

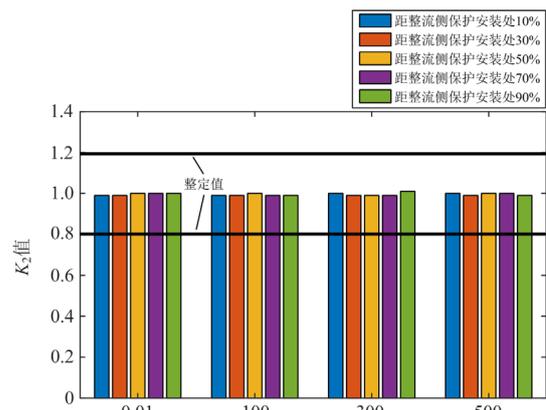
区内故障  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  在不同位置和不同过渡电阻下正负极能量熵之比如图 6 所示。当发生区内正极故障时，保护安装处得到的  $K_2$  均大于 1.2；当发生区内负极故障时，保护安装处得到的  $K_2$  均小于 0.8；当发生区内双极故障时，保护安装处得到的  $K_2$



(a) 区内正极故障时不同过渡电阻下的  $K_2$  值



(b) 区内负极故障时不同过渡电阻下的  $K_2$  值



(c) 区内双极故障时不同过渡电阻下的  $K_2$  值

图 6 区内故障时不同过渡电阻下的  $K_2$  值

Fig. 6  $K_2$  values at different transition resistances when internal faults occur

均在 0.8 到 1.2 之间, 故障极判据得到了有效证明。

### 5.3 故障仿真验证结果

根据 5.1 节与 5.2 节可以得到故障后保护动作情况。由表 4 可知, 当发生区内正极故障时, 仅正极的保护元件动作; 当发生区内负极故障时, 仅负极的保护元件动作; 当发生区内双极故障时, 两极的保护元件均动作; 而发生区外故障时, 保护元件不动作。

表 4 故障仿真动作情况  
Table 4 Fault simulation action

| 故障类型  | 故障位置      | 满足条件                            | 保护出口                             |
|-------|-----------|---------------------------------|----------------------------------|
| $f_1$ | 区内正极故障    | $K_1 > 0.01 \& K_2 > 1.2$       | $P_1$ 、 $P_2$ 动作                 |
| $f_2$ | 区内负极故障    | $K_1 > 0.01 \& K_2 < 0.8$       | $N_1$ 、 $N_2$ 动作                 |
| $f_3$ | 区内双极故障    | $K_1 > 0.01 \& 0.8 < K_2 < 1.2$ | $P_1$ 、 $P_2$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 动作 |
| $f_4$ | 整流侧区外正极故障 | $K_1 < 0.01$                    | 不动作                              |
| $f_5$ | 整流侧区外负极故障 | $K_1 < 0.01$                    | 不动作                              |
| $f_6$ | 逆变侧区外正极故障 | $K_1 < 0.01$                    | 不动作                              |
| $f_7$ | 逆变侧区外负极故障 | $K_1 < 0.01$                    | 不动作                              |

## 6 结论

本文利用混合双端直流输电系统的边界特性, 构造了一种基于 VMD 能量熵的直流线路纵联保护方法。通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建混合双端直流输电模型, 通过模拟不同工况下的故障, 提取电压信号, 进行 VMD 分解, 得到能量熵。利用能量熵区分区内故障和故障极。经分析可得结论如下。

1) 在发生故障时, 由于边界元件的存在, 线路暂态电压骤变, 且故障线路提取的电压故障分量变化量明显大于非故障线路, 此特性可用于构造保护方法。

2) 当系统发生区内外故障时, 所提取的电压故障分量的能量熵不同, 可准确判定区内外故障, 并利用同一侧换流站正负极能量熵之比进行故障极识别。

3) 此方法可准确保护直流线路全长。

4) 此方法可在过渡电阻为  $500 \Omega$  时准确识别故障, 具有较高耐高阻能力, 可在  $3 \text{ ms}$  内快速识别故障并可靠动作。

综上所述, 本文所提的纵联保护方法易于实现, 可靠性高, 适应性强, 具有较高精度, 可准确识别故障。

## 参考文献

- [1] 李旭旻, 顾丹珍, 杨秀, 等. Statcom 对多馈入直流输电系统换相失败恢复过程的影响[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 55-60.
- [2] LI Xumin, GU Danzhen, YANG Xiu, et al. Effect of Statcom on recovery process of commutation failure in multi-infeed HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 55-60.
- [2] 韩伟, 孟沛或, 刘超, 等. 高压直流输电系统接入下的交流系统不对称故障下序网等值及短路电流算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 38-46.
- [2] HAN Wei, MENG Peiyu, LIU Chao, et al. Sequence network equivalence and short-circuit current algorithms for asymmetric faults of AC systems with HVDC connection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 38-46.
- [3] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
- [3] SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [4] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
- [4] YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [5] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [6] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
- [6] TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [7] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [7] LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [8] CHU Xu. Unbalanced current analysis and novel differential protection for HVDC transmission lines based on the distributed parameter model[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 171: 105-115.
- [9] GAO Shuping, CHU Xu, SHEN Quanyu, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end voltage[J]. International

- Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 65: 262-270.
- [10] SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 599-607.
- [11] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.  
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.
- [12] 高淑萍, 叶换飞, 宋国兵. 一种±500 kV 混合双极高压直流输电线路保护的新方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 36-43.  
GAO Shuping, YE Huanfei, SONG Guobing. New protection method of ±500 kV hybrid bipolar high-voltage DC transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 36-43.
- [13] 张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 等. 基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 1-11.  
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [14] 高淑萍, 张楚, 宋国兵, 等. 一种混合双端直流输电线路暂态保护方案[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 9911-9917.  
GAO Shuping, ZHANG Chu, SONG Guobing, et al. A transient protection for hybrid double-ended direct current transmission line[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24): 9911-9917.
- [15] 田书, 康智慧. 基于改进变分模态分解和 SVM 的断路器机械故障振动分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(23): 90-95.  
TIAN Shu, KANG Zhihui. Circuit breaker mechanical fault vibration analysis based on improved variational mode decomposition and SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(23): 90-95.
- [16] 李永刚, 丁其, 赵书涛. 基于变分模态分解的断路器机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 82-86.  
LI Yonggang, DING Qi, ZHAO Shutao. Circuit breaker mechanical fault diagnosis based on variational mode decomposition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 82-86.
- [17] 贾亚飞, 朱永利, 王刘旺, 等. 基于 VMD 和多尺度熵的变压器内绝缘局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 208-217.  
JIA Yafei, ZHU Yongli, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on VMD and multiscale entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 208-217.
- [18] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 221-235.  
ZHU Yongli, JIA Yafei, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 221-235.
- [19] 谢李为, 曾祥君, 柳祎璇. 基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 76-81.  
XIE Liwei, ZENG Xiangjun, LIU Yixuan. Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 76-81.
- [20] 付华, 王婧羽. 基于 SR-VMD 的微弱故障行波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 156-162.  
FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 156-162.
- [21] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于 VMD 与广义 S 变换的 HVDC 线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 125-133.  
FU Hua, WU Sai, XU Yaosong, et al. HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 125-133.
- [22] 黄传金, 周铜. 基于变分模态分解的电能质量扰动检测新方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 116-123.  
HUANG Chuanjin, ZHOU Tong. A new detection method of power quality disturbance based on VMD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 116-123.
- [23] 赵碗君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [24] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2021-12-13

作者简介:

高淑萍(1970—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电线路保护与故障定位、新能源并网关键技术、直流配电网的保护等; E-mail: gao.sp2003@163.com

宋晓辰(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电线路保护与故障定位。E-mail: 1622176893@qq.com

(编辑 许威)