

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240102

基于 EWT 改进限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法

韦廷方^{1,2}, 杨萍¹, 杨湛晔³, 王鹏⁴, 王晓卫⁵

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 海南绿色能源与环境工程技术研究院, 海南 海口 570125; 4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 5. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 直流线路故障的快速可靠识别是柔性直流配电网稳定运行的关键技术。利用限流电抗器的边界条件特性, 提出了一种基于经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)改进限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方法。首先, 利用经验小波变换对直流线路电压进行高频分量提取, 采用改进电压梯度算法作为启动判据。然后, 针对不同故障下直流线路两侧限流电抗器的高频暂态电压的尖峰度不同, 提出利用峭度算法识别区内、外故障的保护判据。最后, 利用 Teager 能量算子, 计算出正、负极线路的高频暂态电压的瞬时能量最大之比, 构成故障选极的判据。实验结果表明, 该方法能够准确地区分故障极以及区内、外故障, 对通信要求低, 具有较好的抗干扰能力, 在不同工况下均能够可靠工作, 可较好地满足柔性直流配电网对保护的速动性与选择性要求。

关键词: 柔性直流配电网; 故障识别; EWT; 高频暂态电压; 峭度; Teager 能量算子

An improved fault protection method for a flexible DC distribution network based on EWT current limiting reactance voltage

WEI Yanfang^{1,2}, YANG Ping¹, YANG Zhanyue³, WANG Peng⁴, WANG Xiaowei⁵

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Hainan Green Energy and Environmental Engineering and Technology Research Institute, Haikou 570125, China; 4. State Grid Henan Electric Power Company Scientific Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 5. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Fast and reliable identification of DC line faults is key to the stable operation of a flexible DC distribution network. Based on the characteristics of boundary conditions of a current-limiting reactor, an improved current-limiting reactance voltage fault protection method for such a network based on empirical wavelet transform (EWT) is proposed. First, EWT is used to extract the high-frequency component of the DC line voltage, and an improved voltage gradient algorithm is adopted as the starting criterion. Then, from the different peaks of the high frequency transient voltage of the current limiting reactor on both sides of the DC line, a protection criterion using a kurtosis algorithm to identify the internal and external fault is proposed. Finally, using the Teager energy operator, this paper calculates the ratio of the instantaneous energy maximum of the high-frequency transient voltage of the positive and negative pole lines. This forms the criterion for fault pole selection. The experimental results show that this method can accurately distinguish the fault pole and internal and external faults, has low communication requirements and good anti-interference ability. It can work reliably in different working conditions, and can better meet the speed and selectiveness requirements for protection of a flexible DC distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61703144).

Key words: flexible DC distribution network; fault identification; EWT; high frequency transient voltage; kurtosis; Teager energy operator

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61703144); 海南省自然科学基金项目资助(521RC1110)

0 引言

随着新能源发电和智能电网的不断发展, 直流配电网也成为了未来配电网发展的主流趋势。传统交流配电网存在许多不足, 包括线路损耗大、电压波动大、传输容量小、三相不平衡现象加剧等问题, 而柔性直流配电网能较好地解决这些问题^[1-3]。但柔性直流配电网故障发生迅速, 在几毫秒内故障电流会迅速增大, 会造成设备损坏, 甚至危害人身安全^[4]。因此, 研究柔性直流配电网的故障保护方案是一项亟待解决的关键问题^[5]。

目前柔性直流配电网故障保护方案可以分为基于单端量的保护以及双端量的保护。其中, 对于单端量保护, 无需考虑通信延迟的问题, 易满足速动性要求。文献[6]通过计算近线路测点的高频暂态电流能量, 来进行区内、外故障识别, 计算正、负极低频电流能量比值来识别故障极。文献[7]通过广义 S 变换提取直流线路故障电流高频频带幅值作为故障特征。文献[8]提出了一种利用小波变换提取高频分量输入到人工神经网络算法进行故障保护的方法, 在一定程度上提高了保护的可靠性。文献[6-8]都是通过提取高频特征分量来进行故障保护的方法, 但存在抗过渡电阻能力不足的缺点。文献[9]利用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)提取测量点的故障暂态电压, 然后计算电压故障分量的能量熵, 构造区内、外故障判据和故障选极判据。该方法缺少对保护性能的分析, 无法保证在其他工作条件下的可靠性和灵敏性。对于双端量保护, 主要是利用线路两侧的电气量在信息上的交互实现, 可靠性比单端量保护高很多。文献[10]利用整流侧和逆变侧测量点线模电流故障分量幅值比的差异作为保护判据。文献[11]利用特定频率下直流线路两端电流相关性的不同来作为区内、外故障判据, 采用正负极电压突变量之比实现选极判据。文献[10-11]根据线路两端特性差异来进行故障保护, 但速动性较差, 可靠性需要进一步提高。文献[12]通过 Savitzky-Golay 滤波对故障信号进行处理, 计算限流电抗电压的裕度因子来判别区内、外故障, 计算限流电抗器两端的峭度值来判别故障极, 该方法可靠性和灵敏性较好, 但通过滤波后, 高频信号里包含的大量特征信息都被消除, 不利于特征信息提取。因此, 本文提出了一种基于经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)改进限流电抗电压的柔性直流配电网故障保护方案。本文的主要贡献如下:

1) 将 EWT 作为高频分量提取方法。EWT 具有

自适应性和小波方法理论完备、计算简单等特点, 而且能够自适应地选择频带, 解决了模态混叠问题, 为接下来故障判据的提出奠定了基础。对电气量的高频分量进行提取, 使得特征量不易受电网波动的影响, 保证其稳定性。

2) 利用改进电压梯度算法作为启动判据, 能够在不误动的情况下, 保证其速动性; 峭度对冲击信号敏感, 引入峭度公式计算尖峰度, 能更好地体现故障信号的特征; 利用 Teager 能量算子来提取瞬时能量, 其具有对幅值变化敏感、计算量小、提取瞬时能量简单等优点, 使该保护方案更可靠。

3) 在各种工作条件下对本文的故障保护方法进行了仿真分析, 均能够正确判别故障, 体现了该方法的可靠性与速动性。

1 柔性直流配电网故障特性分析

1.1 拓扑结构

双端 MMC 型柔性直流配电网模型如图 1 所示, 整流站的 MMC 型换流器采用定直流电流控制, 逆变站的 MMC 型换流器采用定直流电压和定无功功率控制。

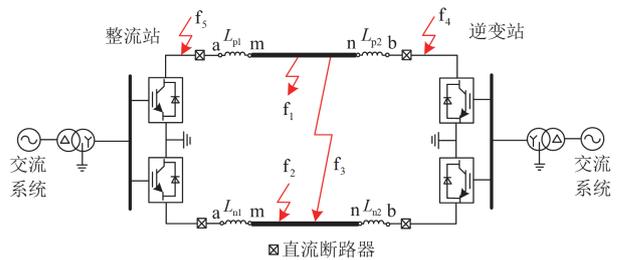


图 1 双端 MMC 型柔性直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of dual-terminal MMC flexible DC distribution network

图 1 中: f_1 — f_5 为设定的故障位置, 其中 f_1 为区内正极故障, f_2 为区内负极故障, f_3 为区内极间故障, f_4 、 f_5 分别为正、反向区外故障; L_{p1} 、 L_{p2} 、 L_{n1} 、 L_{n2} 分别为正、负极直流线路两侧的限流电抗器; a、b 分别为整流侧和逆变侧限流电抗器的外侧; m、n 分别为整流侧和逆变侧限流电抗器的内侧^[13]。

1.2 区内、外故障特性分析

为了分析区内、外故障暂态特性, 在此以正极接地故障为例, 对直流线路两侧的限流电抗两端电压进行分析, 波形如图 2 所示。

由图 2(a)可以看出, 当发生区内故障时, 限流电抗器 L_{p1} 和 L_{p2} 两端的电压均受影响较大, 且波形均呈高尖状。

由图 2(b)可以看出,当发生正向区外故障时,逆变侧限流电抗电压波形呈高尖状,而整流侧限流电抗电压波形相对矮胖。

由图 2(c)可以看出,当发生反向区外故障时,整流侧限流电抗电压波形呈现高尖状,而逆变侧限流电抗电压波形呈现矮胖状。

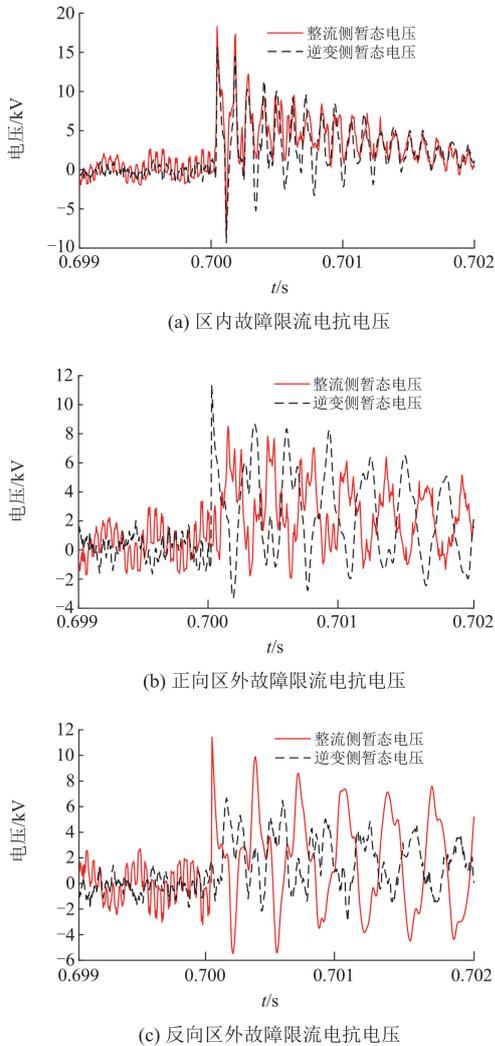


图 2 区内、外故障限流电抗暂态电压波形

Fig. 2 Current-limiting reactor transient voltage waveform for internal and external faults

综上所述,当发生不同故障时,整流侧和逆变侧的限流电抗电压波形尖峰度不同,为后续区内、外故障判据的提出奠定基础。

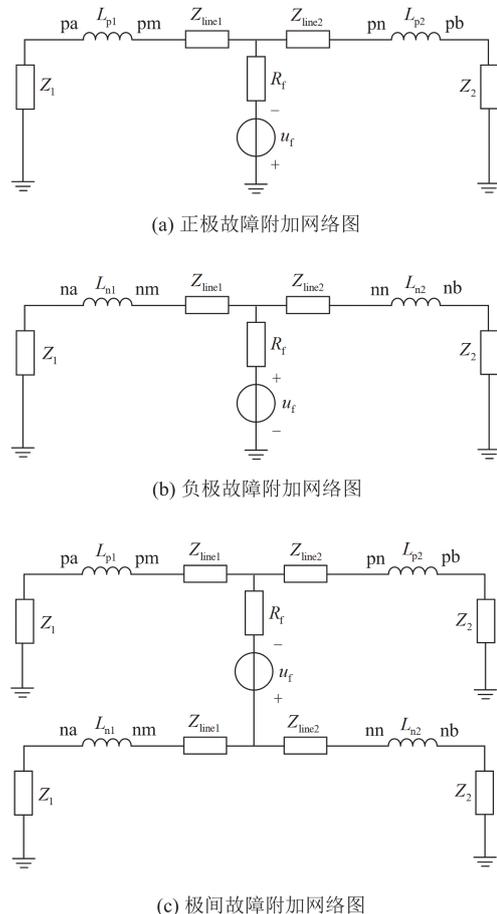
1.3 区内故障特性分析

当配电网发生区内故障时,电路图可以等效为故障前的正常运行系统与故障附加状态的叠加。以故障 f_1 、 f_2 、 f_3 为例分析区内故障附加网络图,如图 3 所示^[14]。

由图 3(a)可以看出,当发生正极故障时,相当于在故障点叠加了一个负电源,此时, u_{pm} 、 u_{pn} 处的电压 u_{pm} 、 u_{pn} 会急速下降,因此, u_{pm} 、 u_{pn} 的暂态能量变化较大;由于线路的耦合作用,负极线路的 u_{nm} 、 u_{nn} 也会下降,但变化微小,因此, u_{nm} 、 u_{nn} 的暂态能量变化较小。

由图 3(b)可以看出,当发生负极故障时,相当于在故障点叠加了一个正电源, u_{nm} 、 u_{nn} 会急速下降,其暂态能量变化较大;同理, u_{pm} 、 u_{pn} 的暂态能量变化较小。

由图 3(c)可以看出,当发生极间故障时,相当于在正极线路与负极线路之间叠加了一个负电源, u_{pm} 、 u_{pn} 会急速上升, u_{nm} 、 u_{nn} 会急速下降,此时暂态能量变化都较大,且呈对称性。



(c) 极间故障附加网络图

图 3 区内故障附加网络图

Fig. 3 Internal fault additional network diagram

2 高频分量的提取

由于直接采集电气量的瞬时值易受电网波动的影响,使得采集信号受到噪声干扰,影响特征信息提取。因此,本文利用 EWT 对电气量的高频暂态

分量进行提取分析, 为下一步故障判据的提出奠定了基础。

1) EWT 结合了 EMD 的自适应性和小波变换计算简单的优点。先通过原始信号的频谱信息求所需带通滤波器, 然后对初始信号的傅里叶频谱进行分割。假设初始信号的傅里叶频谱的频率为 $\omega(\omega \in [0, \pi])$, 傅里叶频谱划分成 N 个连续区间, 那么 EWT 的频带划分边界为两个极大值对应角频率的和的一半^[15-16]。

2) EWT 通过 Meyer 型正交小波基理论, 得到经验尺度函数 $\varphi_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\psi_n(\omega)$ 的公式分别为

$$\varphi_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \omega_n - \tau_n \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right], & \omega_n - \tau_n < |\omega| \leq \omega_n + \tau_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\psi_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_n + \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_{n+1}} (|\omega| - \omega_{n+1} + \tau_{n+1}) \right) \right], & \omega_{n+1} - \tau_{n+1} < |\omega| \leq \omega_{n+1} + \tau_{n+1} \\ \sin \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right) \right], & \omega_n - \tau_n \leq |\omega| < \omega_n + \tau_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\tau_n = \gamma \omega_n (0 < \gamma < 1)$; $\gamma < \min_n \left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n} \right)$;

$n \in [0, N]$; $\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3)$ 。

其中, 经验尺度函数是由低通滤波器构造, 表征了信号的低频特征; 而经验小波函数由高通滤波器构造, 表征了信号的高频特征。

3 柔性直流配电网保护判据

3.1 启动判据

故障发生后, 保护安装处 m 点的高频暂态电压增大, 由此, 提出改进电压梯度算法的保护启动判据为

$$K_1 = |\nabla U(k)| = \left| \sum_{i=0}^2 [U(k-i) - U(k-i-3)] \right| \quad (3)$$

$$K_1 > K_{\text{set1}} \quad (4)$$

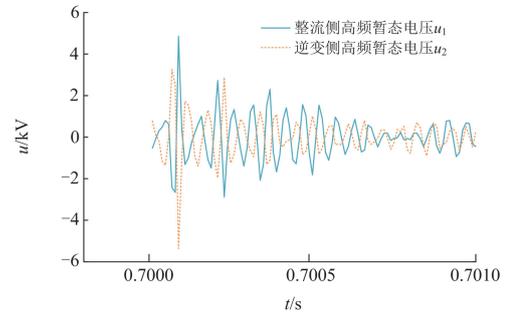
式中: K_1 为启动判据; $U(k-i)$ 和 $U(k-i-3)$ 分别为 m 点 k 时刻前第 i 个和第 $i+3$ 个采样点的高频电压值; $\nabla U(k)$ 为 k 时刻的电压梯度值; K_{set1} 为保护启动

阈值。躲过正常运行时测量点处检测的高频暂态电压梯度最大值, 考虑一定裕度, K_{set1} 取为 5 kV。为躲过雷击干扰, 可将启动数据采样窗口设置在 0.3 ms 内。

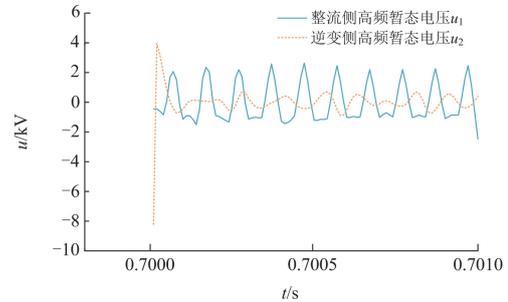
当满足式(4)时, 说明发生故障, 保护启动。改进电压梯度算法能够保证在不误动的情况下, 保证其速动性。

3.2 区内、外故障判据

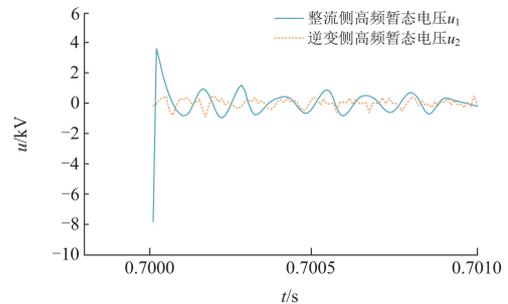
根据第 1.2 节区内、外故障暂态特征分析可知, 可通过对比直流线路两侧的限流电抗器 L_1 和 L_2 的电压波形尖峰度来识别区内、外故障。利用 EWT 提取限流电抗电压的高频暂态分量, 使得故障特征更清晰, 为后续利用峭度^[17-18]算法计算其尖峰度奠定了基础。不同故障时限流电抗器的高频暂态电压波形如图 4 所示。



(a) 区内故障



(b) 正向区外故障



(c) 反向区外故障

图 4 区内、外故障时限流电抗器的高频暂态电压

Fig. 4 High-frequency transient voltage of the current-limiting reactor with the internal and external faults

由图 4 可以看出, 发生区内故障时, 直流线路两侧限流电抗器的高频暂态电压波形相似, 均成高尖状; 发生正向区外故障的初始时刻, 逆变侧限流电抗器的高频暂态电压呈现明显的高尖状, 而整流侧波形尖峰度较低; 发生反向区外故障时, 整流侧波形呈现明显的高尖状, 逆变侧波形呈矮胖状。

峭度定义为随机变量的四阶中心矩除以标准差的四次幂, 是无量纲因子, 用来检验信号偏离正态分布的程度。数据与均值相差越大, 数据中极端值越多, 其峭度值越大。峭度对冲击信号敏感, 因此适用于检测直流线路发生不同故障时的电压所受影响的程度。

峭度公式为

$$Q_i = \frac{\sum_{n=1}^N [u_i(n) - \bar{u}_i]^4}{(N-1)\sigma^4} \quad (5)$$

式中: Q_i 表示限流电抗器 L_i ($i = p1, p2, n1, n2$) 的高频暂态电压的峭度值, p, n 分别表示正、负极, 1、2 分别表示整流侧和逆变侧; N 表示采样点数; $u_i(n)$ 和 \bar{u}_i 分别表示正、负极 L_i 的高频暂态电压和其均值; σ 表示正、负极 L_i 的高频暂态电压的标准差。

在 1 ms 时间窗内, 分别计算出正、负极限流电抗器的高频暂态电压的峭度值, 如表 1 所示。

表 1 区内、外故障时的峭度值

故障类型	Q_{p1}	Q_{p2}	Q_{n1}	Q_{n2}
区内正极故障	6.4367	11.0020	2.5524	3.9859
区内负极故障	2.7909	3.4009	9.6403	8.3751
区内极间故障	8.1087	4.5523	10.5402	3.9960
正向区外故障	2.0250	39.9658	2.0285	34.7140
反向区外故障	32.1192	3.5704	39.3741	2.8169

由表 1 可以看出, 当发生区内正极故障时, 整流侧和逆变侧两个限流电抗器的峭度值差别不大; 当发生正向区外故障时, 逆变侧限流电抗器的峭度值远大于整流侧限流电抗器的峭度值; 当发生反向区外故障时, 整流侧限流电抗器的峭度值远大于逆变侧限流电抗器的峭度值。由此, 可以定义区内、外故障判据为

$$K_2 = \frac{\sum_{n=1}^N [u_2(n) - \bar{u}_2]^4}{\sum_{n=1}^N [u_1(n) - \bar{u}_1]^4} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (6)$$

式中: K_2 为区内、外故障判据; u_1, u_2 和 \bar{u}_1, \bar{u}_2 分别为线路两侧限流电抗器的高频暂态电压及其均值; Q_2, Q_1 分别为正、负极线路两端限流电抗器的高频暂态电压的峭度值。

考虑到噪声、线路电容放电等的影响, 定义可靠系数 K_{set2} 为 0.3, K_{set3} 为 8, 可构成判据为

$$\begin{cases} 0.3 < K_2 < 8, & \text{区内故障} \\ K_2 > 8, & \text{正向区外故障} \\ K_2 < 0.3, & \text{反向区外故障} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 选极判据

1) 根据 1.3 节分析可知, 故障极 m 点的电压瞬时能量幅值远大于非故障极 m 点的电压瞬时能量幅值, 因此可利用 Teager 能量算子^[19-20]提取正、负极 m 点的高频电压瞬时能量幅值构造故障选极判据。

(1) Teager 能量算子的定义。

对于连续信号 $g(t)$, 有

$$\psi[g(t)] = [g'(t)]^2 - g(t) \cdot g''(t) \quad (8)$$

式中, $g'(t)$ 和 $g''(t)$ 分别为 $g(t)$ 的一阶和二阶导数。

对于离散信号 $g(n)$, 有

$$\psi[g(n)] = [g(n)]^2 - g(n+1) \cdot g(n-1) \quad (9)$$

(2) 利用 Teager 能量算子提取正、负极 m 点的高频电压瞬时能量最大值, 如表 2 所示。 T_p, T_n 分别为正、负极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值。

表 2 区内故障时的 m 点的瞬时能量最大值

Table 2 The m -point instantaneous energy maximum in internal faults

故障类型	T_p	T_n	T_p/T_n
正极故障	6 735 042	336 288	20.0276
负极故障	45 257	9 373 292	0.0483
极间故障	6 823 939	6 489 299	1.0516

由表 2 可以看出, 发生正极故障时, 正极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值远大于负极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值, $T_p/T_n \gg 1$; 发生负极故障时, 负极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值远大于正极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值, 即 $T_p/T_n \ll 1$; 发生极间故障时, 正极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值近似等于负极 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值, 即 $T_p/T_n \approx 1$ 。

因此, 构造故障选极判据为

$$K_3 = \frac{T_p}{T_n} \quad (10)$$

式中, K_3 为选极判据。

$$\begin{cases} K_3 > K_{set4}, & \text{正极故障} \\ \frac{1}{K_{set4}} \leq K_3 \leq K_{set4}, & \text{极间故障} \\ K_3 < \frac{1}{K_{set4}}, & \text{负极故障} \end{cases} \quad (11)$$

式中, K_{set4} 为整定值, 考虑一定裕度, 选择整定值 $K_{set4} = 1.5$ 。

2) 为验证继续利用峭度来构造选极判据是否可行, 计算正、负极 m 点的高频暂态电压峭度值, 如表 3 所示。

表 3 区内故障时 m 点的峭度值

Table 3 Kurtosis of m-point in internal faults

故障类型	Q_p	Q_n	Q_p/Q_n
正极故障	4.4367	2.5524	1.7382
负极故障	2.7909	6.6403	0.4202
极间故障	8.1087	10.5402	0.7693

通过表 3 可以看出, 负极故障和极间故障的峭度值之比 Q_p/Q_n 不满足整定原则, 所以利用峭度值之比构造选极判据不可行。

4 柔性直流配电网保护方案

根据第 3 节启动判据, 区内、外故障判据和选极判据, 设计了如图 5 所示的基于 EWT 改进限流电抗电压的柔性直流配电网的故障保护方法流程图。利用改进电压梯度算法设计保护启动判据, 判断保护是否启动; 然后, 计算正、负极直流线路两侧的限流电抗器的高频暂态电压的峭度值之比, 构成区内、外故障识别判据; 若判断为区内故障, 则利用 Teager 能量算子计算正、负极 m 点的高频暂态电压的瞬时能量的最大值之比进行选极, 保护动作,

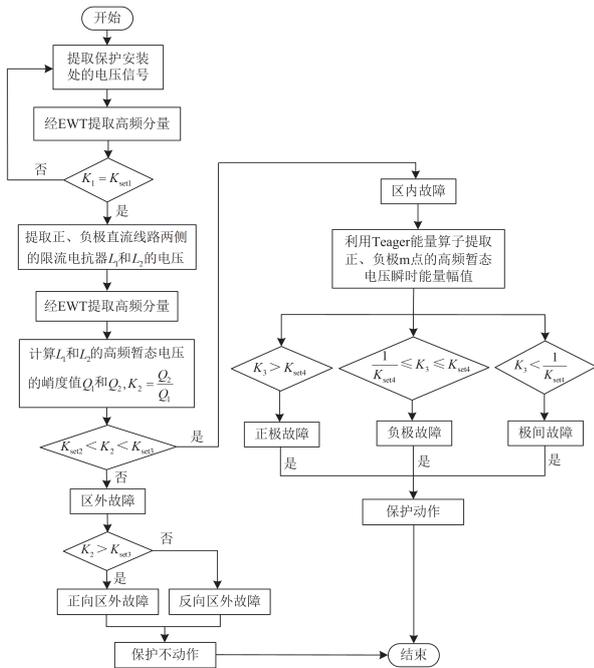


图 5 保护方法流程图

Fig. 5 Flow chart of the protection scheme

否则保护不动作。

5 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建的 ± 30 kV 双端 MMC 型柔性直流配电网, 如图 1 所示, 对保护方法进行验证。设置故障持续时间为 0.1 s, 采样频率为 20 kHz, 故障采样窗口为 1 ms。图 1 的双端柔性直流配电网的仿真参数见表 4。

表 4 柔性直流配电网的仿真参数

Table 4 Simulation parameters of flexible DC distribution network

参数	数值
MMC 额定容量/MVA	20
额定直流电压/kV	± 30
线路长度/km	20
桥臂子模块数量	4
桥臂电抗/mH	6
子模块电容/mF	1
限流电抗/mH	10

5.1 区内、外故障仿真

为可靠判别区内、外故障, 需验证最严重的故障情况下仿真结果的准确性。因此, 对不同故障下金属性故障和高阻接地故障进行仿真验证。

5.1.1 金属性故障

为模拟金属性故障, 过渡电阻取 0.01Ω , 针对故障位置 $f_1 - f_5$ 发生的不同故障进行仿真实验, 得到的故障判别结果如表 5 所示。

表 5 区内、外金属性故障判别结果

Table 5 Identification results of internal and external metallic faults

故障类型	故障位置	K_2	判别结果
f_1	距保护安装处 4 m	0.4101	区内故障
	距保护安装处 10 m	1.6969	区内故障
	距保护安装处 16 m	0.5130	区内故障
f_2	距保护安装处 4 m	0.4081	区内故障
	距保护安装处 10 m	0.8722	区内故障
	距保护安装处 16 m	3.1635	区内故障
f_3	距保护安装处 4 m	0.3462	区内故障
	距保护安装处 10 m	0.3803	区内故障
	距保护安装处 16 m	4.3068	区内故障
f_4	逆变站出口处	19.5004	正向区外故障
f_5	整流站出口处	0.1342	反向区外故障

由表 5 可以看出, 当不同故障类型和不同故障位置发生金属性故障时, 均能够通过 3.2 节区内、外故障判据准确地识别。

5.1.2 区内高阻接地故障

为模拟高阻接地故障, 过渡电阻取 100Ω 、 300Ω 、 500Ω , 针对区内故障 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，得到的故障判别结果如表 6 所示。

表 6 区内高阻接地故障判别结果

Table 6 Identification results of high resistance grounding fault in the area

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	K_2	判别结果
f_1	距保护安装处 4 m	100	3.3475	区内故障
		300	1.5795	区内故障
		500	1.7008	区内故障
	距保护安装处 10 m	100	7.2040	区内故障
		300	2.5154	区内故障
		500	1.8060	区内故障
	距保护安装处 16 m	100	4.8574	区内故障
		300	1.8030	区内故障
		500	2.1058	区内故障
f_2	距保护安装处 4 m	100	1.6093	区内故障
		300	1.4743	区内故障
		500	1.6636	区内故障
	距保护安装处 10 m	100	4.0501	区内故障
		300	1.3575	区内故障
		500	1.5650	区内故障
	距保护安装处 16 m	100	1.2074	区内故障
		300	1.3773	区内故障
		500	1.6171	区内故障
f_3	距保护安装处 4 m	100	0.8177	区内故障
		300	4.5851	区内故障
		500	2.3011	区内故障
	距保护安装处 10 m	100	0.7475	区内故障
		300	1.0569	区内故障
		500	1.4372	区内故障
	距保护安装处 16 m	100	1.1472	区内故障
		300	2.1756	区内故障
		500	1.5440	区内故障

由表 6 可以看出，当在不同故障位置发生区内高阻接地故障时，均能通过本文的区内、外故障判据准确地识别。

5.2 故障选极仿真

当判定为区内故障后，需要对故障极进行判别。针对区内故障 f_1 、 f_2 、 f_3 ，得到正、负极高频暂态电压瞬时能量的仿真结果如图 6 所示。其中： t 表示时间； T 表示高频暂态电压瞬时能量值。

由图 6 可以看出，当发生单极接地故障时，故障极与非故障极的 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值相差很大。当发生极间故障时，故障极与非故障极的 m 点的高频暂态电压瞬时能量最大值几乎一样。因此，能够利用本文的选极判据对故障极进行识别。

为探究不同过渡电阻与不同故障位置对故障选

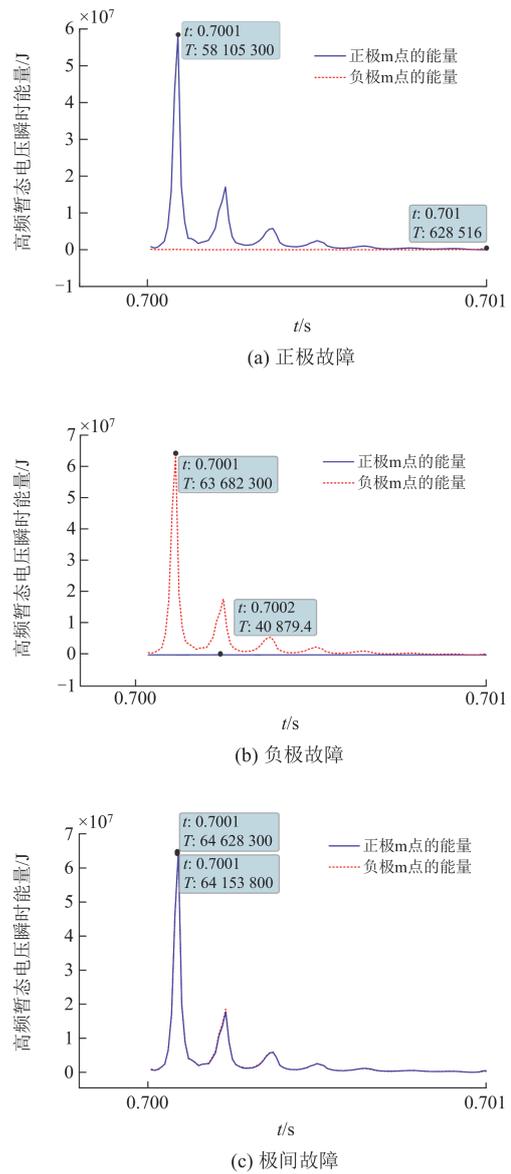
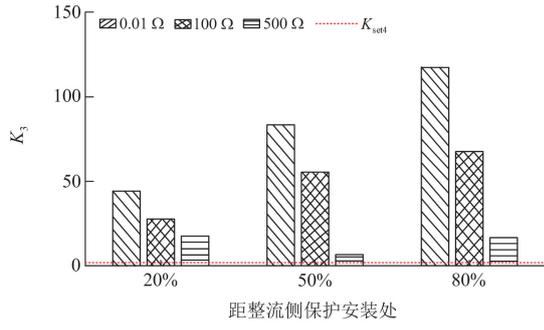


图 6 不同故障时的高频暂态电压瞬时能量

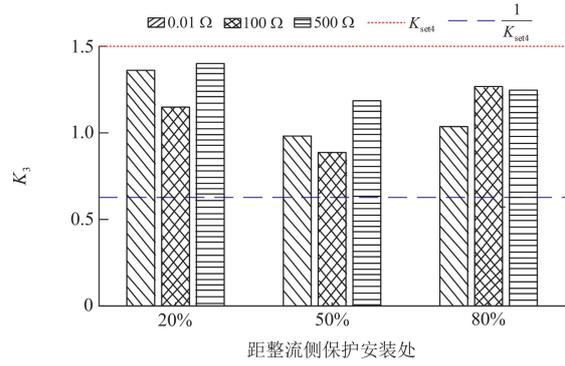
Fig. 6 High-frequency transient voltage instantaneous energy at different faults

极方案的影响，设置区内故障 f_1 、 f_2 、 f_3 的过渡电阻分别为 0.01Ω 、 100Ω 、 500Ω ，故障位置分别为距整流侧保护安装处 20%、距整流侧保护安装处 50%、距整流侧保护安装处 80%，仿真结果如图 7 所示。

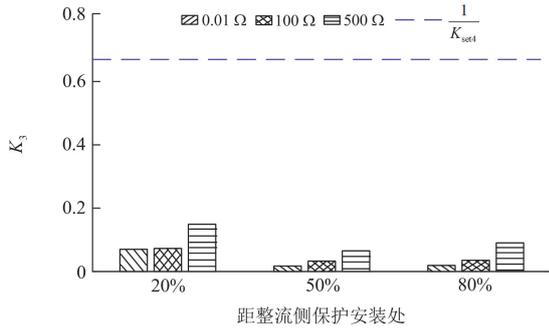
由图 7 可以看出，当发生正极故障时，不同过渡电阻与不同故障位置下的 K_3 均大于 K_{set4} ；当发生负极故障时， K_3 均小于 $1/K_{set4}$ ；当发生极间故障时， K_3 均满足 $1/K_{set4} \leq K_3 \leq K_{set4}$ 。因此，本文的选极判据能够在不同过渡电阻与不同故障位置下可靠地判别故障极。



(a) 正极故障



(c) 极间故障



(b) 负极故障

图 7 不同过渡电阻与故障位置下的瞬时能量比

Fig. 7 Instantaneous energy ratio between different transition resistance and fault position

5.3 保护性能分析

5.3.1 噪声干扰的影响

为了验证噪声干扰下故障判别的可靠性, 在故障信号内添加 20 dB 白噪声, 得到的故障判别结果如表 7 所示。

表 7 20 dB 噪声干扰下的故障判别结果

Table 7 Fault discrimination results under 20 dB noise disturbance

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	K_2	K_3	判别结果
f_1	距整流侧保护安装处 10 m	500	2.5153	5.2501	区内正极
f_2	距整流侧保护安装处 10 m	500	2.2053	0.0630	区内负极
f_3	距整流侧保护安装处 10 m	500	0.5521	1.1855	区内极间
f_4	逆变站出口处	0.01	19.5011	—	正向区外
f_5	整流站出口处	0.01	0.1338	—	反向区外

由表 7 可以看出, 当系统添加 20 dB 白噪声后, 仍然能够可靠地进行故障判别。

5.3.2 不同限流电抗器的影响

限流电抗器的大小会影响故障时的短路电流以及限流电抗电压的大小, 因此, 需要检测本文故障判据在不同限流电抗器大小下的可靠性。限流电抗器分别设置为 0.01 H、0.03 H、0.05 H, 得到的故障判别结果如表 8 所示。

由表 8 可以看出, 在限流电抗器大小改变的情况下, 本文的故障保护方法也能够准确地判别故障类型。

5.3.3 雷击干扰的影响

雷击干扰会引起过电流, 改变故障暂态电压, 影响故障启动判据的判断, 导致误动。因此, 需要检测本文故障启动判据在雷击干扰下的可靠性。图 8 为目前普遍采用 2.6/50 μ s 双指数波的雷电流模型得到的雷击电流波形^[21-22]。

由图 8 可知, 当发生雷击干扰时, 电流幅值迅

速增大, 但是持续时间不超过 0.3 ms。因此, 可将电流的采样时间初始时刻设置在 0.3 ms, 从而躲过雷击干扰的影响。

5.4 与其他方法对比

为了验证本文使用 EWT 来提取高频分量的优越性, 将方法换成自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)算法, 其他条件不变, 得到的故障判别结果如表 9 所示^[23-24]。

由表 9 可以看出, 当 EMD 和 VMD 作为高频分量提取方法时, 都会出错; 将 CEEMDAN 作为高频分量提取方法, 当发生 f_4 正向区外故障时, K_2 的值近似等于 8, 容易出错。由于这 3 种方法的模态混叠严重, 导致分解不够完全, 影响高频分量提取, 产生误判。因此, 本文方法最佳。

表 8 不同限流电抗器下的故障判别结果

Table 8 Fault discrimination results under different current-limiting reactors

故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	限流电抗器/H	K_2	K_3	判别结果
f_1	距整流侧保护安装处 10 m	500	0.01	1.8060	5.2487	区内正极
			0.03	2.1381	60.1598	区内正极
			0.05	2.6122	174.4886	区内正极
f_2	距整流侧保护安装处 10 m	500	0.01	1.5650	0.0630	区内负极
			0.03	1.6552	0.0247	区内负极
			0.05	2.1204	0.0093	区内负极
f_3	距整流侧保护安装处 10 m	500	0.01	1.4372	1.1855	区内极间
			0.03	4.4880	1.1448	区内极间
			0.05	5.8137	0.9009	区内极间
f_4	逆变站出口处	0.01	0.01	19.5004	—	正向区外
			0.03	23.5264	—	正向区外
			0.05	25.7427	—	正向区外
f_5	整流站出口处	0.01	0.01	0.1342	—	反向区外
			0.03	0.0849	—	反向区外
			0.05	0.0888	—	反向区外

表 9 不同高频分量提取方法的故障判别结果

Table 9 Fault discrimination results of different high-frequency component extraction methods

高频分量提取方法	故障类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	K_2	K_3	判别结果
CEEMDAN	f_1	距整流侧保护安装处 10 m	500	3.3645	7.7410	区内正极
	f_4	逆变站出口处	0.01	8.0809	—	正向区外
EMD	f_1	距整流侧保护安装处 10 m	500	4.0534	21.4678	区内正极
	f_4	逆变站出口处	0.01	2.2815	—	出错
VMD	f_1	距整流侧保护安装处 10 m	500	9.9821	5.3689	出错
	f_4	逆变站出口处	0.01	10.3649	—	正向区外

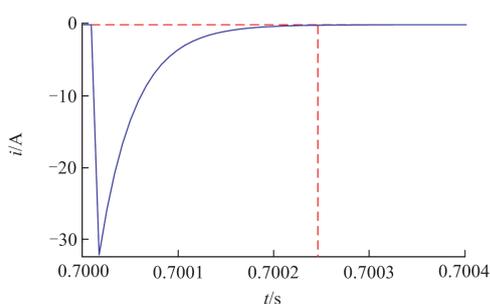


图 8 雷击电流波形

Fig. 8 Lightning strike current waveform

6 结论

本文针对双端 MMC 型柔性直流配电网系统，提出了一种基于 EWT 改进限流电抗电压的故障保护方法，通过仿真验证可得到如下结论。

1) 利用 EWT 提取故障电压信号的高频分量，能够减少电网波动对特征信息提取的影响，保证故障保护的可靠性。

2) 利用改进电压梯度算法构造故障启动判据，改善了单一采样点易发生误动的缺点，使得系统在不误动的情况下，保证其速动性。

3) 计算正、负极直流线路两侧的限流电抗器的高频暂态电压的峭度值之比，可以区分区内、外故障；利用 Teager 能量算子计算正、负极 m 点的高频暂态电压瞬时能量之比，可以判别区内故障的故障类型。

4) 通过对故障判据的仿真验证以及各种性能分析可以看出，本文所用的故障保护方法能够快速准确地判别区内、外故障以及故障极，具有较强的抗噪声干扰和防雷干扰能力。

参考文献

[1] 王聪博, 贾科, 赵其娟, 等. 基于故障全电流相关性检验的柔性直流配电网线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1764-1775.
WANG Congbo, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Pilot protection for flexible-DC distribution line based on

- correlation test of DC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1764-1775.
- [2] 郑涛, 郭勇帆, 吕文轩, 等. 基于电力电子变压器故障穿越策略的低压直流配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 152-161.
ZHENG Tao, GUO Yongfan, LÜ Wenxuan, et al. Protection for low-voltage DC distribution network based on fault ride-through strategy of power electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 152-161.
- [3] 兰征, 袁英硕, 何东, 等. 一种基于电流微分初始值的直流配电网故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 109-116.
LAN Zheng, YUAN Yingshuo, HE Dong, et al. A fault location method for DC distribution network based on differential initial value of current[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 109-116.
- [4] 魏来, 李波, 廖凯, 等. 基于改进 Jaccard 系数的柔性直流配电网纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 75-86.
WEI Lai, LI Bo, LIAO Kai, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution network based improved Jaccard coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 75-86.
- [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] 付华, 陈浩轩, 李秀菊, 等. 含边界元件的 MMC-MTDC 直流侧单端量故障辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 215-226.
FU Hua, CHEN Haoxuan, LI Xiuju, et al. MMC-MTDC DC side single-ended quantity fault identification method with boundary elements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 215-226.
- [7] 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.
- [8] XIANG W, YANG S, WEN J. ANN-based robust DC fault protection algorithm for MMC high-voltage direct current grids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(2): 199-210.
- [9] 高淑萍, 宋晓辰, 宋国兵, 等. 基于 VMD 能量熵的混合双端直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 123-132.
GAO Shuping, SONG Xiaochen, SONG Guobing, et al. Longitudinal protection scheme of hybrid double-terminal DC transmission lines based on VMD energy entropy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 123-132.
- [10] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流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.
- [11] 戴志辉, 刘宁宁, 张程, 等. 基于电流相关性的高压直流线路纵联保护新原理[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 8-15.
DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. A protection principle for HVDC lines based on current correlation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 8-15.
- [12] 韦延方, 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 for flexible DC distribution network faults based on current limiting reactance voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5068-5079.
- [13] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- [14] 邢鲁华, 陈青, 高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 107-113, 6.
XING Luhua, CHEN Qing, GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 107-113, 6.
- [15] 洪翠, 连淑婷, 郭谋发, 等. 经验小波变换在直流配电系统故障检测中的应用[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 65-74.

- HONG Cui, LIAN Shuting, GUO Moufa, et al. Application of empirical wavelet transform in fault detection of DC distribution system[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 65-74.
- [16] 赵荣珍, 李霁蒲, 邓林峰, 等. EWT 多尺度排列熵与 GG 聚类的轴承故障辨识方法[J]. 振动.测试与诊断, 2019, 39(2): 416-423, 451.
- ZHAO Rongzhen, LI Jipu, DENG Linfeng, et al. Method integrate EWT multi-scale permutation entropy with GG clustering for bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 416-423, 451.
- [17] 吕凯波, 姜培生, 谷丰收, 等. 基于声压信号能量峭度的早期切削颤振预警技术研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 50-55.
- LÜ Kaibo, LOU Peisheng, GU Fengshou, et al. A study on early chatter monitoring based on energy kurtosis index of acoustic signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 50-55.
- [18] 李玉豪, 刘远宏. 基于 VMD-相关系数-峭度提取行星齿轮箱故障特征[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 262-267.
- LI Yuhao, LIU Yuanhong. Fault feature extraction of planetary gearbox based on VMD correlation coefficient kurtosis[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(6): 262-267.
- [19] 黄梓幸, 宋冬利, 董俭雄, 等. 基于改进 VMD 和 Teager 能量算子解调的轴箱轴承故障诊断方法[J]. 机械, 2022, 49(12): 39-47.
- HUANG Zixing, SONG Dongli, DONG Jianxiong, et al. Fault diagnosis method of axle box bearings based on improved VMD and Teager energy operator demodulation[J]. Machinery, 2022, 49(12): 39-47.
- [20] 陈武, 王培丰, 钟建伟, 等. 一种改进 VMD 与 Teager 能量算子的电能质量扰动检测方法[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2023, 41(3): 344-352.
- CHEN Wu, WANG Peifeng, ZHONG Jianwei, et al. Power quality disturbance detection method based on improved VMD and Teager energy operators[J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2023, 41(3): 344-352.
- [21] 郑涛, 吴琼, 吕文轩, 等. 基于直流电流过零特征的柔性直流配电网保护方案研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1806-1815.
- ZHENG Tao, WU Qiong, LÜ Wenxuan, et al. Research on protection scheme of flexible DC distribution grids based on DC current zero-crossing characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1806-1815.
- [22] 戴志辉, 秦昊宇, 李杭泽, 等. 基于反射系数和模型匹配的柔性直流电网单端量线路保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 101-109.
- DAI Zhihui, QIN Haoyu, LI Hangze, et al. Single-end line protection based on reflection coefficient and model matching in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 101-109.
- [23] 吕英俊, 于鹏, 王雅倩, 等. 基于 CEEMDAN 能量熵的 MMC-HVDC 电缆线路单极接地故障检测方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 101-104.
- LÜ Yingjun, YU Peng, WANG Yaqian, et al. CEEMDAN energy entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC cable lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 101-104.
- [24] 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.

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-04-17

作者简介:

韦延方(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其新型输配电的分析与控制; E-mail: meilaier@163.com

杨萍(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护故障检测; E-mail: 3179187669@qq.com

杨湛晔(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为能源互联网研究. E-mail: kriksharp@foxmail.com

(编辑 魏小丽)