

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230393

基于测量阻抗电阻分量符号的“网孔型” 柔直电网线路纵联保护

戴志辉, 石旭

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 对于限流电抗器装设于换流站出口的“网孔型”柔性直流电网而言, 线路之间无边界存在, 基于边界效应的保护不再适用。同时, 传统的差动类保护存在延迟长和严格通信同步的问题。为此, 提出一种基于测量阻抗电阻分量符号的纵联保护方案。通过对“网孔型”直流电网的 Peterson 等效电路进行分析发现, 当发生区内故障时, 线路两端的测量阻抗电阻分量符号相同, 而当发生区外故障时, 二者符号相反。根据这一特征, 利用连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)提取测量阻抗的实部并构造保护判据。理论分析和仿真结果表明所提保护方案能够可靠、快速地识别各种类型的直流线路故障, 具备耐高阻和强噪声的能力, 且无需双端数据的严格同步。

关键词: “网孔型”直流电网; 纵联保护; Peterson 等效电路; 测量阻抗

Line pilot protection of a mesh DC grid based on the sign of the resistance component in measured impedance

DAI Zhihui, SHI Xu

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: For a mesh DC power grid with current-limiting reactor installed at the outlet of a converter station, there is no boundary between the lines, and protection based on the boundary effect is no longer achievable. In addition, traditional differential protection has problems with long delays and strict communication synchronization requirements. Therefore, a pilot protection scheme based on the sign of the resistance component in measured impedance is proposed. Through analysis of the Peterson equivalent circuit of a mesh DC power grid, it is found that when an internal fault occurs, the signs of resistance component in measured impedance at both ends of the line are the same, while when an external fault occurs, the two signs are opposite. According to this characteristic, the real part of the measured impedance is extracted by continuous wavelet transform (CWT), and a protection criterion is constructed. Theoretical analysis and simulation results show that the proposed protection scheme can identify various types of HVDC line faults reliably and quickly, and can withstand high resistance and strong noise, without the need for strict synchronization of double-end data.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

Key words: mesh DC power grid; pilot protection; Peterson equivalent circuit; measured impedance

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 光伏、风电等新能源并网需求不断增加。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流电网能够实现大规模可再生能源的高效、灵活消纳, 并且具有谐波含量低、无换相失败问题、控制灵活

等优势, 是未来新型电力系统的重要组成部分^[1-3]。柔性直流电网具有惯性小、阻尼低等特性, 且换流站中的电力电子器件耐流能力较弱, 故柔性直流电网对线路保护的速动性提出了更高要求^[4-6]。

柔性直流输电线路保护按是否需要线路两侧信息交互可分为单端量保护和双端量保护两类^[7]。其中, 单端量保护基于本地信息构造, 无需通信和同步, 动作速度快, 常用作主保护。然而, 单端量保护存在耐高阻故障能力差, 依赖线路边界等问题^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

相比之下, 双端量保护利用线路两侧信息判断故障区域, 选择性和灵敏性更好, 常用作后备保护。文献[9]结合相邻线路的分流特性和限流电抗器的分压特性, 利用线路两端边界暂态能量比的差异识别区内外故障。文献[10]利用电抗器对高频分量的阻滞特性, 构造基于限流电抗器两端高频电压幅值比的纵联保护。文献[9-10]均以限流电抗器装设于线路出口的柔直电网拓扑为研究对象, 这种布置方式可以使故障时远端换流器的放电回路流过更大的电抗值, 防止换流器的闭锁^[11]。而随着越来越多的主动限流控制策略被提出, 换流站闭锁问题将不再是系统配置的主要考虑因素^[12-13]。在此背景下, 限流电抗器装设于换流站出口的“网孔型”柔直电网优势更加明显, 相比于限流电抗器置于线路出口的柔直电网, 其优势在于: 1) 能够大大减小直流线路的总电抗, 从而提升动态响应能力, 并减小系统投资; 2) 可解耦边界元件取值与保护性能的内在关联^[14]。因此, 未来柔直电网的形态有将限流电抗器放置于线路出口侧的发展趋势, 并将会得到更广泛的关注。

对于“网孔型”柔直电网拓扑, 线路之间的边界效应将不复存在, 边界元件的缺失导致故障行波由故障线路向相邻非故障线路传播时仅受换流站较小程度滤波的影响, 区内外故障时所测电气量能量在各频带内的分布特征差异度变小, 文献[9-10]的保护难以适用。鉴于此, 文献[15]分析了区内外故障时线路两端电压行波的极性特征, 利用第二个电压行波的极性进行故障识别, 但该方案依赖于行波的可靠检测和波头的正确标定, 对于近端故障不易识别。文献[16]采用 Hausdorff 距离度量故障与非故障线路两侧同/异名行波在图形学上的匹配差异, 提出一种不依赖于边界元件及同步对时的波形匹配式差动保护, 对保护装置的采样频率要求较高。文献[17-20]分别以行波折、反射系数或其变式作为特征量构造保护判据, 保护性能依赖于精确的线路参数, 而实际中线路参数的误差是不可避免的, 因此, 保护的動作性能将受线路参数误差的影响。文献[21]引入相关分析法来表征不同行波之间的相关性, 并设计相应的動作判据实现对故障的识别, 需要传递行波的多个采样点信号。文献[22]引入基于连续采样的保护判据, 同时考虑线路差动电流方向和幅值, 在一定程度上消除了分布电容的影响, 但需要保持双端数据的同步。

针对上述问题, 本文面向“网孔型”柔直电网, 提出一种基于测量阻抗电阻分量符号的保护方案, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建相应模型, 仿真验证了所提方案的正确性。

1 “网孔型”柔直电网典型拓扑结构

本文以限流电抗器装设于换流器出口的“网孔型”直流电网为研究对象, 其拓扑结构如图 1 所示, 系统主要参数见附录 A 表 A1。整个系统为对称双极结构, 其中 MMC2 站采用定直流电压和定无功功率控制方式, 其余 3 个 MMC 站采用定有功功率和定无功功率控制方式, 所有换流器均采用半桥子模块拓扑。

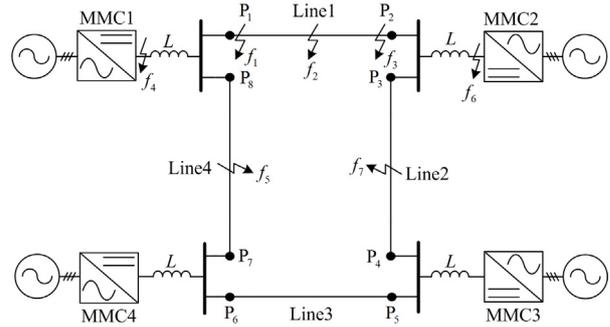


图 1 “网孔型”直流电网拓扑单线图

Fig. 1 Single-line topology of mesh DC grid

图 1 中: $P_1 - P_8$ 为线路端点处的保护测点(规定保护正方向为母线指向线路); Line1—Line4 为直流输电线路, 其杆塔结构见附录 A 图 A1。以 Line1 作被保护对象为例, $f_1 - f_3$ 均为区内故障, 其中 f_1 为线路首端故障, f_2 为线路内部故障, f_3 为线路末端故障; $f_4 - f_7$ 均为区外故障, 其中 f_4 和 f_6 为换流器出口故障, f_5 和 f_7 为相邻线路出口故障。

考虑到柔直电网线路保护速动性要求高, 而基于故障行波的保护可提供最快的動作速度, 因此本文所关注的时间尺度为故障后的行波阶段。由于故障行波仅与故障分量网络有关, 故后文的分析仅在故障分量网络中展开。MMC 的闭锁时间一般为 3~5 ms, 因此, 在所关注的时间尺度下, 只需要考虑 MMC 子模块闭锁前的电容放电阶段^[15-17]。鉴于控制系统固有的时滞特性, 通常认为此阶段内的换流器控制未来得及起作用, 整个换流器阻抗参数基本保持恒定。从直流侧看入, MMC 换流器的等效阻抗 Z_{MMC} 可由 RLC 二阶串联电路等效表示, 在复频域下有

$$Z_{\text{MMC}}(s) = \frac{2}{3}R_0 + \frac{2}{3}sL_0 + \frac{N}{3sC_0} \quad (1)$$

式中: s 为复频率; R_0 、 L_0 和 C_0 分别为 MMC 换流器的桥臂电阻、桥臂电感和子模块电容; N 为 MMC 换流器每相上、下桥臂投入的子模块数量和。

2 区内外故障时的测量阻抗分析

2.1 故障行波的线模分量

柔直电网采用双极架空线路作为电能传输的通道,两根极线同塔架设且平行排布。为消除两极线路之间的耦合,可利用极模变换将双极线路的行波解耦为相互独立的模量。极模变换如式(2)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta u_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_p \\ \Delta u_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta i_0 \\ \Delta i_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_p \\ \Delta i_n \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δ 代表故障分量; u 和 i 分别代表电压和电流; 下标 p 和 n 分别代表正、负极量; 下标 1 和 0 分别代表以正极为基准极的 1 模分量和 0 模分量。

相较于 1 模行波, 0 模行波在传播过程中衰减幅度较大, 色散现象较为严重。另外, 在双极故障时不存在 0 模分量, 故选取 1 模分量进行故障分析并构造保护。后文中除特别说明外, 默认所提电气量均为由式(2)得到的 1 模分量^[19]。

2.2 区内故障分析

2.2.1 线路内部故障

鉴于一次拓扑的对称性, 后文仅以 P_1 为例对系统内可能出现的故障进行分析(被保护线路为 Line1), 其余测点的分析可以类推。换流站可认为是集中参数元件, 而线路为分布参数元件, 线路测点属于波阻抗突变点。为便于行波计算, 根据波过程理论, 可利用 Peterson 法则将行波在波阻抗突变点处的折反射过程转化为集中参数等效电路(称为 Peterson 等效电路)的求解。当发生线路内部故障时, 在 Peterson 法则成立的时间尺度内, 对应的 Peterson 等效电路如图 2 所示。

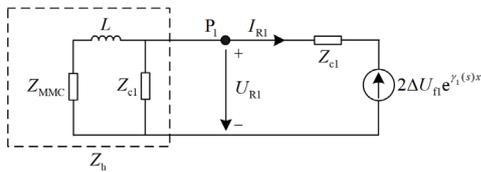


图 2 线路内部故障时的 Peterson 等效电路

Fig. 2 Peterson equivalent circuit when the fault occurs inside the line

图 2 中: L 为限流电抗器电感; Z_{c1} 为被保护线路 Line1 的 1 模波阻抗; $\gamma_1(s)$ 为被保护线路 Line1 的 1 模行波传播系数, x 代表故障点到 P_1 的距离, $\Delta U_{01}(s)$ 代表故障点处的初始电压行波, 其表达式与故障点所在位置和过渡电阻有关。由于 P_1 为波阻抗

不连续点, 故该点处测量到的电压 $U_{R1}(s)$ 和电流 $I_{R1}(s)$ 应为对应电气量入射波和反射波的叠加。根据图 3, 有

$$\begin{cases} U_{R1}(s) = \frac{Z_h(s)}{Z_h(s) + Z_{c1}(s)} 2\Delta U_{01}(s) e^{-\gamma_1(s)x} \\ I_{R1}(s) = -\frac{2\Delta U_{01}(s) e^{-\gamma_1(s)x}}{Z_h(s) + Z_{c1}(s)} \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$Z_h(s) = [sL + Z_{MMC}(s)] // Z_{c1}(s) \quad (4)$$

定义测量点处电压和电流的比为测量阻抗, 由式(3)可知, 线路内部故障时 P_1 处的测量阻抗 $Z_m(s)$ 为

$$Z_m(s) = \frac{U_{R1}(s)}{I_{R1}(s)} = -Z_h(s) \quad (5)$$

2.2.2 线路首端或末端故障

本节对故障位于线路端口处这一特殊故障情况进行分析, 认为线路端口故障同样属于区内故障。当故障点位于线路首端时, 对应的 Peterson 等值电路如图 3 所示。

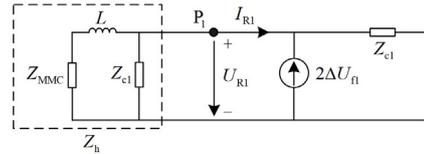


图 3 线路首端故障时的 Peterson 等效电路

Fig. 3 Peterson equivalent circuit when the fault occurs at the beginning of the line

由图 3 可知, P_1 处测量到的故障行波不经过直流线路, 故障点处电压即为 P_1 处的电压, 如式(6)所示。

$$U_{R1}(s) = 2\Delta U_{01}(s) \quad (6)$$

根据图 3 可得 P_1 处的电流 $I_{R1}(s)$ 为

$$I_{R1}(s) = -\frac{U_{R1}(s)}{Z_h(s)} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)可得线路首端故障时 P_1 处的测量阻抗, 其表达式与式(5)相同。

当故障点位于线路末端时, 对应的 Peterson 等值电路与图 2 具有相同的电路结构。只是来自故障点的行波经过了线路全长的衰减, 因此 $U_{R1}(s)$ 和 $I_{R1}(s)$ 的表达式与式(3)类似, 只需要将式(3)中的 x 替换为 l (代表线路全长)即可, 进而得到线路末端故障时 P_1 处的测量阻抗表达式同式(5)。

2.3 区外故障分析

2.3.1 正向区外故障

当发生正向区外故障时, 故障点处的行波首先

折射至被保护线路, 折射波 $\Delta U'_{\text{fl}}(s)$ 经线路全长的衰减后达到 P_1 。此时 $U_{R1}(s)$ 和 $I_{R1}(s)$ 的表达式与式(3)类似, 只需要将式(3)中的 $U_{\text{fl}}(s)e^{-\gamma_1(s)x}$ 替换为 $U'_{\text{fl}}(s)e^{-\gamma_1(s)l}$ 即可。进而得到正方向故障时 P_1 处的测量阻抗同式(5)。

2.3.2 反向区外故障

当发生反向区外故障时, 对应的 Peterson 等效电路如图 4 所示。

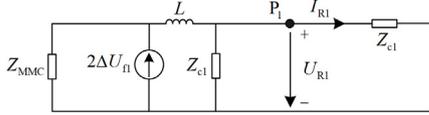


图 4 反向区外故障时的 Peterson 等效电路

Fig. 4 Peterson equivalent circuit under the backward external fault

由图 4 可知反方向故障时 P_1 处的测量阻抗为

$$Z_m(s) = \frac{U_{R1}(s)}{I_{R1}(s)} = Z_{c1}(s) \quad (8)$$

2.4 测量阻抗分析

综合 2.2 节和 2.3 节的分析, 以 Line1 为被保护对象, 将直流线路不同位置故障时线路两端的测量阻抗总结于表 1。

表 1 不同位置故障时的测量阻抗

Table 1 Measured impedance at different fault locations

故障位置	P_1 处测量阻抗	P_2 处测量阻抗
f_1-f_3	$-Z_h(s)$	$-Z_h(s)$
f_4-f_5	$Z_{c1}(s)$	$-Z_h(s)$
f_6-f_7	$-Z_h(s)$	$Z_{c1}(s)$

从表 1 中可以看出, 无论故障发生于何处, 被保护线路两侧测量阻抗的表达式只有 $-Z_h(s)$ 和 $Z_{c1}(s)$ 。且当故障发生于不同区域时, 线路两侧的测量阻抗有所不同, 可据此构造纵联保护来甄别区内外故障。文献[23-26]均基于高频段下两侧测量阻抗的幅值构造不同的保护判据, 然而, 由图 5 所示的 $-Z_h(s)$ 和 $Z_{c1}(s)$ 的幅频特性(图中 $|Z_m(s)|$ 为测量阻抗 Z_m 的幅值)及式(4)所示的 $Z_h(s)$ 表达式可知, 随着频率的逐渐增高, $|-Z_h(s)|$ 逐渐趋于 $|Z_{c1}(s)|$, 两者在 1 kHz 后的幅值几乎一致, 难以仅凭幅值区别开来。

为克服上述问题, 本文在幅值信息的基础上引入相角信息, 利用测量阻抗实部(即电阻分量)构造保护, 图 6 给出了测量阻抗实部随频率变化曲线, 图中纵坐标 $\text{Re}[Z_m]$ 为测量阻抗 Z_m 的实部。

由图 6 可知, $\text{Re}[Z_{c1}(s)]$ 在全频段下均大于 0, $\text{Re}[-Z_h(s)]$ 的最大值出现在 MMC 换流器的谐振频

率处, 此时 $Z_{\text{MMC}}(s) = 0$, 于是有

$$\text{Re}[-Z_h(s)]_{\text{max}} = -\text{Re}[sL/Z_{c1}(s)] < 0 \quad (9)$$

式中, $\text{Re}[-Z_h(s)]_{\text{max}}$ 代表 $\text{Re}[-Z_h(s)]$ 的最大值。

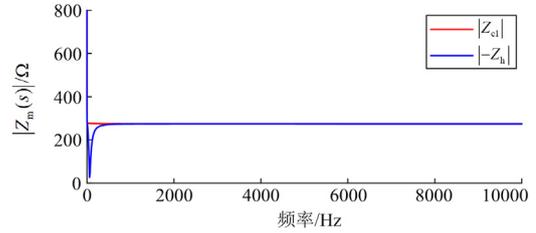


图 5 测量阻抗的幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic for measured impedance

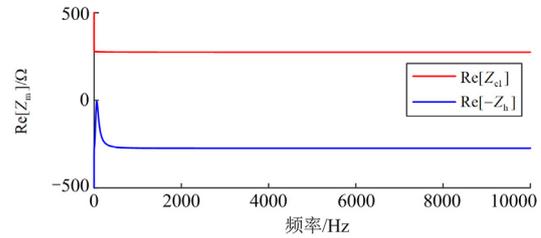


图 6 测量阻抗电阻分量随频率变化的曲线

Fig. 6 Curve of measured resistance component vs. frequency

因此, $\text{Re}[-Z_h(s)]$ 在全频段下均小于 0。结合表 1 可知, 保护正、反方向故障时, 测量阻抗电阻分量的符号有所差异, 即: 在区内故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量的符号相同且均为负; 而在区外故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量的符号相反。且现有直流架空线路的波阻抗在高频段下的幅值为 200~400 Ω, 故上述特征差异明显。通过判别线路两端测量阻抗电阻分量的极性, 便可识别线路的区内、外故障。

选择一种合适的时频变换方法来提取测量阻抗实部信息对保护性能的提升至关重要。与快速傅里叶变换相比, 由于连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)在处理非平稳信号时可自动调节时频窗口, 故其计算精度更优, 且具有一定的抗干扰能力^[27]。因此, 本文采用 CWT 算法进行阻抗计算。为减小频谱泄漏及时域采样信号切割边界对计算精度的影响, 在进行 CWT 运算前, 本文对数据窗内的数据进行加窗处理。

3 保护方案

3.1 故障识别判据

3.1.1 数据窗长度

根据 2.3 节的结论, 可构造区内外故障识别判

据的基本依据。但上述结论满足一定的条件才成立,包括:①在数据窗长度内须保证 Peterson 法则成立;②MMC 换流器尚未闭锁。根据文献[18],本文取数据窗长度为故障前后各 0.5 ms。

3.1.2 识别判据

根据第 2 节的分析,利用测量阻抗电阻分量的符号构造故障识别判据。考虑到测量误差与小波提取误差及高频噪声的影响,选取不同频率点处测量阻抗实部的平均值 \bar{R} 构造保护识别判据。令

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Re}[Z_m(f_i)] \quad (10)$$

式中: n 为所选频点数量; $Z_m(f_i)$ 代表频率为 f_i 时的测量阻抗。根据采样定理,记采样频率为 f_s ,则 $f_i \in [0, f_s/2]$ 。

故障识别判据为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{区内故障:} \begin{cases} \bar{R}_1 < 0 \\ \bar{R}_2 < 0 \end{cases} \\ \text{首端区外故障:} \begin{cases} \bar{R}_1 > 0 \\ \bar{R}_2 < 0 \end{cases} \\ \text{末端区外故障:} \begin{cases} \bar{R}_1 < 0 \\ \bar{R}_2 > 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (11)$$

式中, \bar{R}_1 和 \bar{R}_2 分别代表被保护线路首端和末端的电阻分量平均值。由式(11)可知,当计算线路某一侧测点处的测量阻抗时,不必使用对侧保护测点处的电气量信息,仅需要将得到的逻辑信号传输至直流线路的另一侧来识别故障。因此,所提保护不需要线路两端的数据同步,通信要求低。同时无须确定复杂的阈值,无须区分正、反向行波。

3.2 保护逻辑

采用改进电压梯度法作为启动判据,采用零序电压积分作为选极判据,相关定值及整定原则见文献[19]。保护判别流程描述如下。

1) 首先采集线路两侧的电压和电流,代入启动判据。若满足启动判据则保护启动,否则,继续对电气量进行采集。

2) 以启动判据首次成立时的采样时刻为故障时刻,取故障时刻前后各 0.5 ms 为数据窗长,然后根据式(1)提取电压、电流的线模分量,并加 Blackman 窗。

3) 采用 CWT 算法对暂态电压最大时刻下各频率点的测量阻抗电阻分量进行计算,代入式(11)所示故障识别判据。若判断为区内故障,则进入步骤 4), 否则,保护复归。

4) 根据故障选极元件的输出结果选择故障极并向故障隔离设备发送动作命令。

4 仿真实证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的“网孔型”多端柔直电网仿真模型,以 Line1 为被保护线路验证所提保护的性能。系统参数如附录 A 表 A1,直流输电线路采用依频参数模型,杆塔模型见附录 A 图 A1。设故障均发生于 1.0 s,故障持续时间为 1 s,保护采样频率为 50 kHz。以 Morlet 小波为小波分析的母小波,CWT 的中心频率 $f_c = 2$ Hz,带宽频率 $f_b = 10$ Hz。

4.1 区内故障仿真分析

4.1.1 单极接地故障

考虑到双极线路的对称性,此处仅以正极金属性接地故障为例,当故障点位于 Line1 首端(f_1)、中点(f_2)和末端(f_3)时, P_1 和 P_2 处的测量阻抗电阻分量的仿真结果如图 7 所示(图中, $\text{Re}[Z_{m1}]$ 和 $\text{Re}[Z_{m2}]$ 分别表示 P_1 和 P_2 处测量阻抗的电阻分量,后同)。

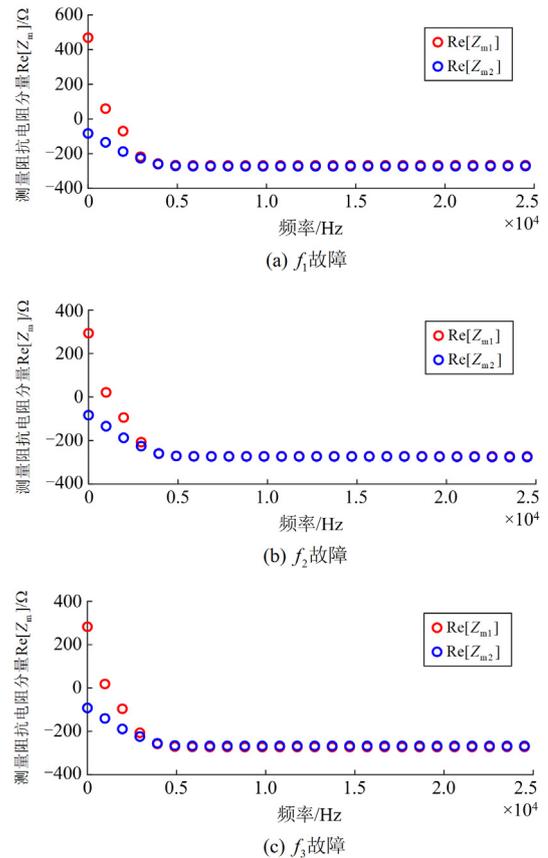


图 7 区内正极接地故障下测量阻抗电阻分量
Fig. 7 Resistance component of measured impedance under internal monopolar fault

由图 7 可以看出, 由于时窗较短, 在低频段, 仿真结果与理论计算值(图 6)有些许偏离, 但从整体频域上看, 测量阻抗电阻分量平均值的符号并没有受到影响。当发生区内单极接地故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量在所选频段内符号相同, 且为负。各故障点沿频率轴求平均后的结果如表 2 所示。

表 2 区内正极接地故障下测量阻抗电阻分量平均值

Table 2 Average value of measured impedance resistance component under internal monopolar fault

故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
f_1	-229.17	-255.73
f_2	-238.14	-257.31
f_3	-238.28	-252.15

结合表 2 和式(11)所示故障识别判据, 上述 3 种故障均判定为区外故障。

4.1.2 双极故障

同样以金属性接地故障为例, 当故障点位于 Line1 首端(f_1)、中点(f_2)和末端(f_3)时, P_1 和 P_2 处的测量阻抗电阻分量的仿真结果如图 8 所示。

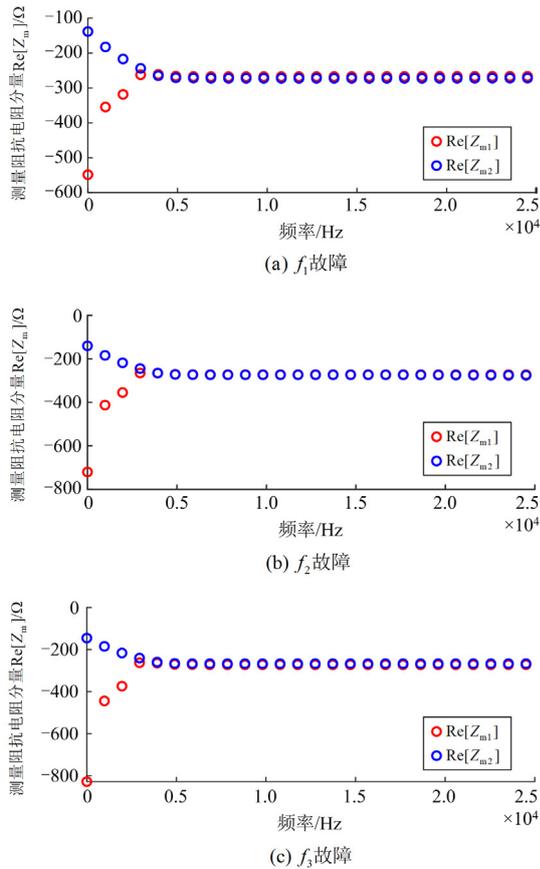


图 8 区内双极故障下测量阻抗电阻分量

Fig. 8 Resistance component of measured impedance under internal bipolar fault

由图 8 可以看出, 当发生区内双极故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量在所选频段内符号相同, 且都为负。各故障点沿频率轴求平均后的结果如表 3 所示。

表 3 区内双极故障下测量阻抗电阻分量平均值

Table 3 Average value of measured impedance resistance component under internal bipolar fault

故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
f_1	-276.97	-261.46
f_2	-288.21	-263.06
f_3	-291.76	-257.35

结合表 3 和式(11)所示故障识别判据, 上述 3 种故障均判定为区内故障。

4.2 区外故障仿真分析

4.2.1 单极接地故障

以正极金属性接地故障为例, 当故障点位于换流站出口(f_4)和相邻线路(f_5)时, P_1 和 P_2 处的测量阻抗电阻分量的仿真结果如图 9 所示。

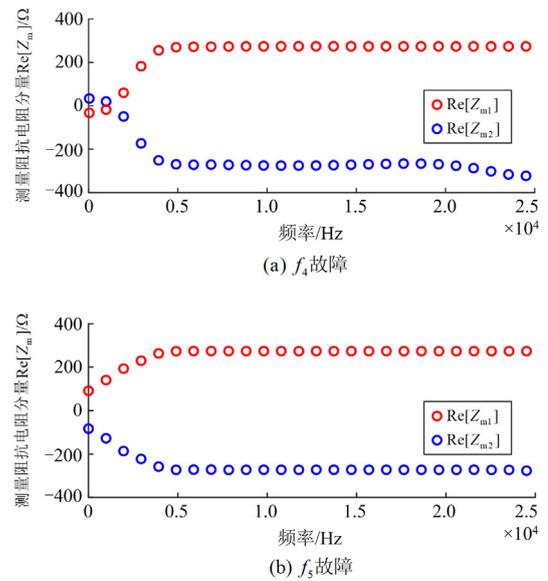


图 9 区外正极接地故障下测量阻抗电阻分量

Fig. 9 Resistance component of measured impedance under external monopolar fault

由图 9 可以看出, 当发生区外单极接地故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量在所选频段内符号相反。各故障点沿频率分量求平均后的结果如表 4 所示。

结合表 4 和式(11)所示故障识别判据, 上述两种故障均判定为区外故障。

4.2.2 双极故障

以金属性接地故障为例, 当故障点位于换流站出口(f_4)和相邻线路(f_5)时, P_1 和 P_2 处的测量阻抗

电阻分量的仿真结果如图 10 所示。

表 4 区外单极接地故障下测量阻抗电阻分量平均值
Table 4 Average value of measured impedance resistance component under external monopolar fault

故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
f_4	238.51	-240.95
f_5	258.52	-255.55

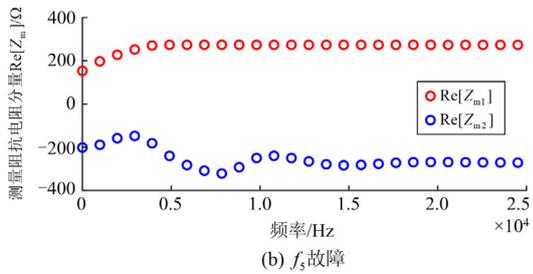
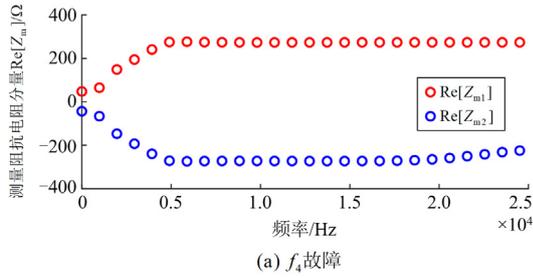


图 10 区外双极故障下测量阻抗电阻分量

Fig. 10 Measured impedance resistance component under external bipolar fault

由图 10 可以看出, 当发生区外双极接地故障时, 线路两端测量阻抗电阻分量在所选频段内符号相反。各故障点沿频率轴求平均后的结果如表 5 所示。

表 5 区外双极故障下测量阻抗电阻分量平均值

Table 5 Average value of resistance component of measured impedance under external bipolar fault

故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
f_4	250.06	-242.08
f_5	265.19	-253.41

结合表 5 和式(11)所示故障识别判据, 上述两种故障均判定为区外故障。

4.3 影响因素分析

4.3.1 过渡电阻与故障距离

为全面分析保护方案的正确性, 考察所提保护对故障距离及过渡电阻的适应性。故障电阻设置为 0~600 Ω, 故障距离以故障点与 P_1 之间的长度占线路全长的百分比表示, 仿真结果如表 6 所示, 其中“PF”表示正极接地故障, “NF”表示负极接地故障,

“PN”表示双极故障。

从表 6 可以看出, 在各种区内故障情况下均有 $\bar{R}_1 < 0$ 且 $\bar{R}_2 < 0$ 成立; 在各种区外故障情况下, \bar{R}_1 和 \bar{R}_2 的符号相反。因此故障识别元件均可正确动作, 且具有较强的抗过渡电阻(600 Ω)能力。

表 6 不同故障电阻和故障距离的仿真结果

Table 6 Simulation results of different fault resistance and fault distance

故障位置	过渡电阻/Ω	\bar{R}_1	\bar{R}_2
f_1 _25% (PF)	300	-244.64	-250.28
	600	-268.17	-268.14
f_1 _50% (PN)	300	-241.94	-252.50
	600	-239.16	-246.19
f_1 _75% (NF)	300	-242.28	-261.72
	600	-239.74	-259.26
f_2 (PF)	300	-252.75	-262.63
	600	-240.56	-226.29
f_3 (PN)	300	-256.62	-258.47
	600	-247.59	-246.36
f_4 (NF)	300	257.48	-246.74
	600	255.35	-244.82
f_5 (PF)	300	269.64	-256.16
	600	265.92	-253.07
f_6 (PN)	300	-259.46	247.21
	600	-252.03	245.69
f_7 (NF)	300	-252.85	249.30
	600	-248.84	250.27

4.3.2 噪声干扰

现场的采样数据中存在噪声干扰。考虑目前测量装置信噪比通常大于 30 dB, 在仿真获得的采样数据中叠加信噪比为 30 dB 的高斯白噪声以模拟实际的采样值, 此时保护的识别情况见表 7。

表 7 不同信噪比下的仿真结果

Table 7 Simulation results for various signal-noise ratios

信噪比/dB	故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
30	f_2	-275.61	-256.78
	f_4	265.46	-129.54
	f_7	-192.45	288.33
50	f_2	-236.47	-258.41
	f_4	275.59	-152.05
	f_7	-262.11	253.45

由表 7 可知, 不同噪声的测量波阻抗会影响测量阻抗的提取, 但依旧满足区内故障时 \bar{R}_1 与 \bar{R}_2 同号且均为负、区外故障时 \bar{R}_1 与 \bar{R}_2 异号的结论。一方面,

连续小波变换本身具有一定的消噪能力^[28]。另一方面, 由于所提保护以极性做特征量, 且使用多个频点下数据的平均值进行故障识别, 能够在一定程度上减小噪声的影响。当加入信噪比大于 30 dB 的噪声后, 保护仍能正确识别直流线路的内、外故障。

4.3.3 线路长度

直流线路故障时, 保护测点处检测到的故障暂态量受线路长度的影响。线路越长, 行波在线路上的衰减越明显, 测点处检测到的故障暂态量越微弱, 进而可能影响特征量的计算结果。因此, 需要考察线路长度对保护方案的影响。以附录 A 表 A1 所示长度为基准, 各线路分别扩大 2~3 倍, 对不同线路长度下保护的性能进行仿真测试, 仿真结果如表 8 所示(相应数据窗长须满足 4.1.1 节的要求)。

表 8 不同线路长度下的区内外故障仿真结果

Table 8 Simulation results of internal and external faults for various line length

线路长度扩大倍数	故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
2	f_2	-254.31	-251.47
	f_4	247.93	-245.89
	f_7	-254.52	248.22
3	f_2	-252.28	-255.14
	f_4	248.73	-243.29
	f_7	-249.15	247.71

从表 8 中可以看出, 不同的线路长度对应的特征量数值大小略有不同, 但预设的整定值仍有足够的裕度保证保护的选择性和可靠性, 表明所提保护可以适应不同线路长度。

4.3.4 限流电抗器大小

限流电抗器参数变化时保护的灵敏性是评估保护性能的重要因素。不同电抗器幅值下的仿真结果如表 9 所示。

表 9 不同限流电抗器参数下的仿真结果

Table 9 Simulation results for various current-limiting reactor parameters

限流电抗器大小/mH	故障位置	\bar{R}_1	\bar{R}_2
100	f_2	-249.37	-249.58
	f_4	244.66	-253.37
	f_7	-256.85	251.59
200	f_2	-246.71	-258.42
	f_4	247.15	-257.04
	f_7	-253.53	256.72

从表 9 中可以看出, 所提保护对于限流电抗器参数变化具有较强的鲁棒性。

5 结论

以无明显线路边界的“网孔型”柔直电网为研究对象, 利用 Peterson 等效电路分析了线路故障时两端的测量阻抗。研究发现, 线路区内外故障时测量阻抗幅值并不明显, 而测量阻抗实部的符号具有明显差异。通过连续小波变换对测量阻抗的实部进行提取, 构造了基于测量阻抗电阻分量符号的故障识别判据。最后, 通过大量仿真测试对所提保护方案进行了验证, 主要结论如下:

1) 线路区内故障时两端测量阻抗电阻分量符号相同且均为负; 区外故障时, 两端测量阻抗电阻分量符号相反, 且近故障侧测量阻抗电阻分量符号为正, 远故障侧测量阻抗电阻分量符号为负。基于此差异可有效识别直流线路区内外故障, 原理清晰简单, 可据此构造“非边界依赖型”保护。

2) 大量仿真结果表明所提保护方案能够可靠、灵敏地识别输电线路区内、外各种类型故障, 且通信通道仅需要传输线路两端判别逻辑量, 对信号同步要求不高。

3) 所提保护不需要确定定值, 省去了整定过程。不需要正、反向行波的精确提取, 且具有一定的抗噪声能力, 对系统参数的变化不敏感。

附录 A

表 A1 四端直流电网参数

Table A1 System parameters of the four-terminal

MMC-HVDC grid

系统参数	数值
线路长度/km	Line1: 184.4
	Line2: 101
	Line3: 131.1
	Line4: 78.3
直流电压/kV	±500
换流器子模块数量	200
子模块电容/mF	MMC1: 15
	MMC2: 10
	MMC3: 15
	MMC4: 15
桥臂电抗器/mH	MMC1: 100
	MMC2: 100
	MMC3: 50
	MMC4: 50
限流电抗器/mH	150

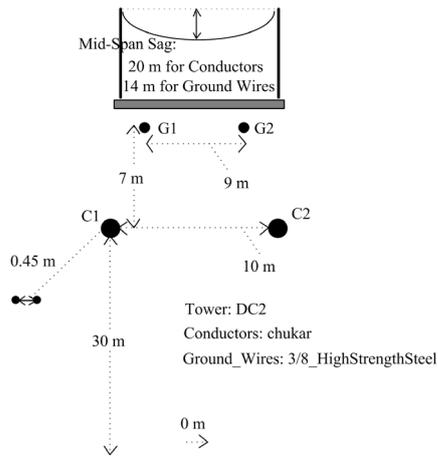


图 A1 直流线路杆塔模型

Fig. A1 DC line tower model

参考文献

- [1] 朱金涛, 辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1-11, 94.
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11, 94.
- [2] 王子文, 张英敏, 李保宏, 等. 柔性直流电网潮流转移特性及安全运行影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 103-113.
WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LI Baohong, et al. Analysis of power flow transfer characteristics and influence on the safety operation of a flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 103-113.
- [3] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [4] HE Jinghan, CHEN Keao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 151-165.
- [5] 吴通华, 黎钊, 李新东, 等. 适配柔直系统快速性及可靠性需求的雷击干扰识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 1-12.
WU Tonghua, LI Zhao, LI Xindong, et al. Lightning interference identification method for the speed and reliability of a flexible DC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 1-12.
- [6] 李奇南, 夏勇军, 张晓林, 等. 计及电压测量特性的 MMC 中高频阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 84-93.
LI Qinan, XIA Yongjun, ZHANG Xiaolin, et al. Medium-high frequency impedance modeling of MMC and system stability analysis considering voltage measurement characteristics[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 84-93.
- [7] 王强钢, 倪静怡, 廖建权, 等. 基于模量相平面的柔性直流电网 T 接线路故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 140-148.
WANG Qianggang, NI Jingyi, LIAO Jianquan, et al. Fault identification method for teed lines of flexible DC power grid based on modulus phase plane[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 140-148.
- [8] 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.
- [9] 高飘, 郑晓冬, 晁晨翔, 等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 171-179.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.
- [10] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887.
- [11] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [12] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.
- [13] NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920-931.
- [14] 周泽雷, 吴正平, 付翊航, 等. 多端直流电网的非边界依赖型线路故障辨识方案[J]. 电力系统及其自动化

- 报, 2023, 35(4): 100-108, 123.
ZHOU Zelei, WU Zhengping, FU Yihang, et al. Line fault identification scheme for multi-terminal DC grid independent of boundary component[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023, 35(4): 100-108, 123.
- [15] 郑涛, 宋祥艳. 适用于多端直流电网的电压极性比较式行波保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4690-4698.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Traveling wave protection scheme of voltage polarity comparison formula for multi-terminal DC power network[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4690-4698.
- [16] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3832.
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3832.
- [17] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6592.
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6592.
- [18] 魏霖, 童宁, 林湘宁, 等. 面向多端直流电网的高可靠性允许式纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊 1): 95-108.
WEI Lin, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. VSC-MTDC oriented high reliable permissive pilot protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 95-108.
- [19] 戴志辉, 秦昊宇, 邱宏逸, 等. 基于电压行波折射系数的柔性直流电网线路纵联保护[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4676-4689.
DAI Zhihui, QIN Haoyu, QIU Hongyi, et al. Line pilot protection of flexible DC grid based on voltage traveling-wave refraction coefficient[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4676-4689.
- [20] TONG Ning, LIN Xiangning, LI Chengcheng, et al. Permissive pilot protection adaptive to DC fault interruption for VSC-MTDC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123.
- [21] 林湘宁, 刘琦, 范理想, 等. 基于相关分析的多端直流电网线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 45-55.
LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 45-55.
- [22] 彭发喜, 汪震, 邓银秋, 等. 混合式直流断路器在柔性直流电网中应用初探[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2092-2098.
PENG Faxi, WANG Zhen, DENG Yinqiu, et al. Potentials of hybrid HVDC circuit breakers application to MMC-HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2092-2098.
- [23] 张大海, 武传健, 和敬涵, 等. 利用测量波阻抗欧几里得距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3895-3905.
ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Backup protection scheme for flexible DC transmission lines by measuring wave impedance Euclidean distance[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3895-3905.
- [24] 陈淼, 贾科, 陈聪, 等. 基于高频阻抗曲线匹配的混合直流输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 119-125.
CHEN Miao, JIA Ke, CHEN Cong, et al. Pilot protection for hybrid DC transmission line based on high-frequency impedance curve matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 119-125.
- [25] LIU Ningning, LI Yongli, LI Song, et al. A pilot protection for LCC-HVDC transmission lines based on measured surge impedance at tuning frequency[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2090-2103.
- [26] 李小鹏, 滕予非, 刘耀, 等. 基于测量波阻抗的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 617-623.
LI Xiaopeng, TENG Yufei, LIU Yao, et al. Pilot protection based on measured surge impedance for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 617-623.
- [27] 李春, 赵玉勇, 吴方舟, 等. 基于高频谐振识别的光伏直流汇集支路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 150-158.
LI Chun, ZHAO Yuyong, WU Fangzhou, et al. Fault location for photovoltaic DC collecting branch based on high frequency resonance identification[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 150-158.
- [28] 任哲锋. 基于系统高频阻抗测量的配电网故障定位方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
REN Zhefeng. Research on high frequency impedance based fault location in distribution system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-09-22

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

石旭(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为高压直流输电保护与控制。E-mail: 120222101040@ncepu.edu.cn

(编辑 周金梅)