

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240654

基于 LCC 注入信号归一化面积差的混合多端直流输电系统 永久性故障识别方案

高超¹, 侯俊杰¹, 樊艳芳¹, 宋国兵^{1,2}, 吴小芳³, 李鹏霄⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 西安交通大学电气工程学院,
陕西 西安 711049; 3. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
4. 国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为避免混合多端直流输电系统重合于永久性故障对系统造成二次危害, 提出一种基于电网换相型换流器(line commutation converter, LCC)注入信号的永久性故障识别方案。首先, 利用 LCC 的故障控制能力, 对 LCC 触发角施加附加控制策略实现信号注入, 分析确定了注入信号的频率、时长、幅值, 提出一种基于 LCC 的信号注入策略。其次, 分析了不同故障性质下信号注入后电压在分布参数模型下的差异性, 发现了不同故障性质下由于线路模型差异导致本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异明显。最后, 结合上述幅值差异性构造归一化面积差, 实现永久性故障识别。结合 PSCAD/EMTDC 仿真结果可得, 所提方案仅利用单端数据, 不受数据通信影响, 且无需仿真整定, 能够可靠识别永久性故障, 可以耐受 400 Ω 过渡电阻和 40 dB 噪声干扰, 适用于 1500 km 及以下长度线路。
关键词: 混合多端直流输电系统; 永久性故障识别; 注入信号; 幅值差异; 归一化面积差

Permanent fault identification scheme for hybrid MTDC systems based on normalized area difference of LCC injected signals

GAO Chao¹, HOU Junjie¹, FAN Yanfang¹, SONG Guobing^{1,2}, WU Xiaofang³, LI Pengxiao⁴

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 711049, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 4. Urumqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: To prevent secondary damage caused by reclosing onto permanent faults in hybrid multi-terminal DC (MTDC) systems, a permanent fault identification scheme based on line commutation converter (LCC) signal injection is proposed. First, leveraging the fault control ability of LCC, an additional control strategy is applied to the LCC firing angle to realize signal injection. The frequency, duration and amplitude of the injected signal are analyzed and determined, and an LCC signal injection strategy is formulated. Secondly, the voltage difference after signal injection under different fault properties is analyzed using a distributed parameter model. It is found that due to differences in line models, there is a significant amplitude difference between the measured voltage at the local end and the calculated voltage at the remote end under different fault properties. Finally, a normalized area difference is constructed based on the above amplitude difference to realize permanent fault identification. PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed scheme utilizes single end data, is immune to data communication issues, requires no simulation-based parameter tuning, and can reliably identify permanent faults. It is capable of withstanding 400 Ω fault resistance and 40 dB noise interference, and is suitable for lines up to 1500 km in length.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507000).

Key words: hybrid MTDC power system; permanent fault identification; signal injection; amplitude difference; normalized area difference

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507000); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C662); “天池英才”引进计划项目资助; “天山英才培养”计划项目资助(2022TSYCLJ0019)

0 引言

传统高压直流输电系统使用电网换相型换流器(line commutation converter, LCC), 可实现远距离、大容量、跨区域电能传输, 但是作为受端时容易发生换相失败^[1]。随着可关断器件的出现, 具有高可控性的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)快速发展, 相对于 LCC, VSC 无需考虑换相失败问题^[2]。在 VSC 众多拓扑结构中, 模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)以其高度模块化的设计, 兼备易于拓展、谐波电压少等特点, 目前已成为柔性直流输电工程的首选技术方案。但 MMC 成本较高、损耗大^[3]。因此, 结合了二者优势的混合直流输电系统具有广阔的发展前景^[4-5], 如乌东德混合三端直流输电工程。

远距离、大容量直流输电工程一般使用架空线路进行电能传输, 其故障概率较高, 且故障后需进行重合闸操作以恢复系统供电。然而, 目前实际工程中混合多端直流输电系统的重合闸方案仍沿用传统高压直流输电工程的重合闸方案, 具有盲目性, 容易对具有脆弱性的换流器造成二次冲击^[6]。因此有必要在重合闸前进行永久性故障识别, 提高系统恢复的可靠性。

目前的研究多集中在柔性直流输电系统的故障性质识别, 针对混合多端直流输电系统的研究仍然较少。文献[7]通过全桥 MMC 向健全极直流线路注入电压特征信号, 利用直流线路极间耦合特性和电压行波传播特性差异进行故障性质识别。但该方法没有考虑限流电抗器的影响。文献[8]利用混合 MMC 注入特征信号, 在分布参数模型下建立了包含故障距离和过渡电阻的故障定位方程, 利用求得的故障距离极性识别永久性故障。文献[9]利用混合 MMC 注入信号在分布参数模型下不同故障性质时的幅值分布特性, 提出了故障性质识别方法, 但该方案与线路长度有关且适用于混合 MMC 系统。文献[10]提出了一种基于双端注入的等效阻抗相位特性的永久性故障识别方法, 该方法要求两端注入时间同步。文献[11]利用混合 MMC 注入特征信号, 根据行波传输理论识别系统的故障性质, 所提方法的性能受采样率、直流边界和过渡电阻的影响。文献[12]利用混合 MMC 注入信号的交流电压分量幅值特征识别永久性故障。文献[13]利用断路器注入特征信号, 通过对侧线横行波电流推演值与测量值波形相似度的差异识别永久性故障。文献[14-18]利用直流混合断路器向故障线路注入特征信号, 根据信号注入后行波折反射极性识别永久性故障, 该方

法易受采样率等因素影响。文献[19]利用 LCC 注入电流信号, 通过求解故障方程实现永久性故障识别, 该方法受采样率影响。文献[20]利用 LCC 注入电流信号, 通过对端电流测量值与计算值差异实现永久性故障识别, 该方法受数据通道影响。文献[21]利用 LCC 注入电压信号, 利用行波传输原理实现永久性故障识别, 该方法易受采样率影响。

综上所述, 一方面, 基于主动注入特征信号的永久性故障识别方案大多基于具备故障自清除能力的混合 MMC 或全桥 MMC 以及直流断路器, 适用于柔性直流输电系统, 仅有少量文献探讨了基于 LCC 注入信号的永久性故障识别方案, 针对混合多端直流输电系统的故障性质识别方案研究较少; 另一方面, 大多数故障性质识别方案未考虑线路分布电容电流的影响, 且受采样率、直流边界等因素的影响, 性能有待进一步提升。因此, 有必要进一步研究基于 LCC 的混合多端直流输电系统永久性故障识别方案。

本文利用 LCC 注入特征信号, 分析了不同故障性质下信号注入后电压在分布参数模型下的特征差异性, 发现了由于线路模型差异导致不同故障性质下本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异明显。因此, 利用上述幅值差异构造归一化面积差, 实现永久性故障识别。结合仿真结果可得, 该方案仅利用单端数据, 不受数据通信影响, 且无需仿真整定, 能够可靠识别永久性故障, 可耐受 400 Ω 过渡电阻和 40 dB 噪声干扰, 受采样率、直流边界影响较小, 适用于 1500 km 及以下长度线路。

1 基本实现思路

混合多端直流输电系统拓扑如图 1 所示。该系统由一个送端 LCC 和两个受端 MMC 组成, T 接母线将直流线路连接到逆变器。

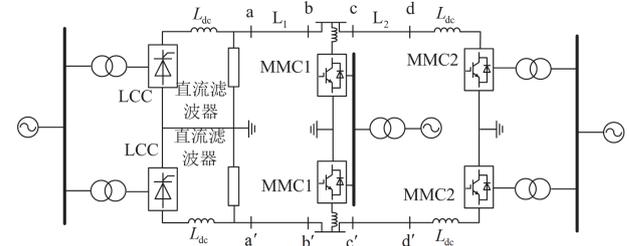


图 1 混合多端直流输电系统拓扑

Fig. 1 Topology of hybrid multi-terminal HVDC system

图 1 中: a、b、c、d 为正极保护安装处; a'、b'、c'、d' 为负极保护安装处; L_{dc} 为限流电抗器。系统正常运行时, 由线路本端电压可计算得到

线路对端电压，且由于无故障支路，线路模型为无故障模型，故本端电压测量值与对端电压计算值的幅值近似相等。本文利用 LCC 实现特征信号注入进而识别永久性故障，信号注入前需经固定延时去游离，因此发生瞬时性故障时，在信号注入时刻故障支路已经消失，其在信号注入后的线路模型与系统正常运行时的线路模型一致，此时本端电压测量值与对端电压计算值的幅值近似相等。瞬时性故障时信号注入后的线路模型如图 2 所示。图中 R_0 、 L_0 、 C_0 分别为单位长度线路的电阻、电感和电容参数。

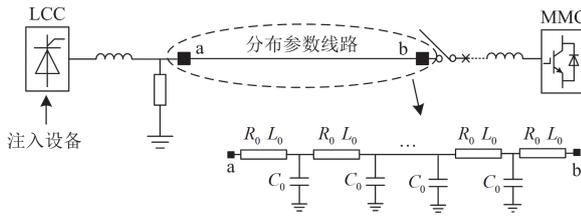


图 2 瞬时性故障时信号注入后的线路模型

Fig. 2 Line model after signal injection with temporary fault

如图 2 所示，瞬时性故障时，故障发生后对端断路器断开，对端可等效为开路，由于本文注入信号频率较低(20 Hz)，因此对地电容支路可近似为开路，此时线路中不存在故障支路，因此无故障回路，故信号注入时段内线路中电流为 0，注入电压呈上升趋势，且幅值较大。瞬时性故障时本端电压测量值与对端电压计算值示意图如图 3 所示。图中 u_{ma} 为本端电压测量值， u_{cb} 为对端电压计算值。

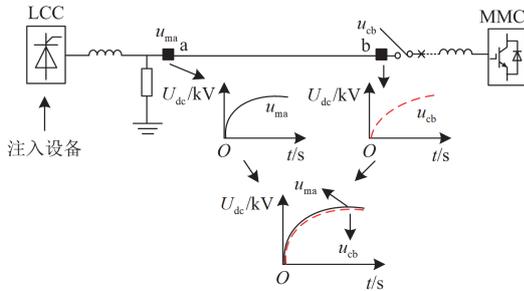


图 3 瞬时性故障时本端电压测量值与对端电压计算值

Fig. 3 Measured value of local end voltage and calculated value of remote end voltage with temporary fault

发生永久性故障时，在信号注入后故障支路仍然存在，线路模型为故障模型，本端电压测量值与对端电压计算值的幅值存在较大差异。永久性故障时的线路模型如图 4 所示。图 4 中， R_f 为过渡电阻。

如图 4 所示，永久性故障时，故障发生后对端和对地电容支路可等效为开路，但由于故障支路的存在，电流经故障支路与大地形成回路，此时线路中电流不为 0，注入电压呈正弦变化，且电压幅值

较低。本端电压测量值与对端电压计算值示意图如图 5 所示。

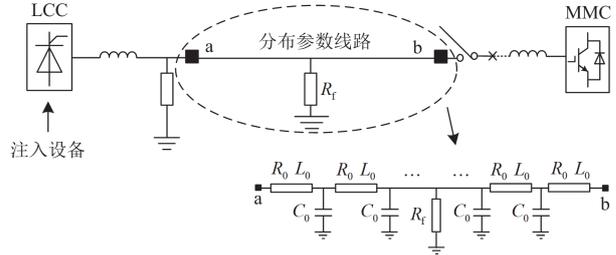


图 4 永久性故障时的线路模型

Fig. 4 Line model with permanent fault

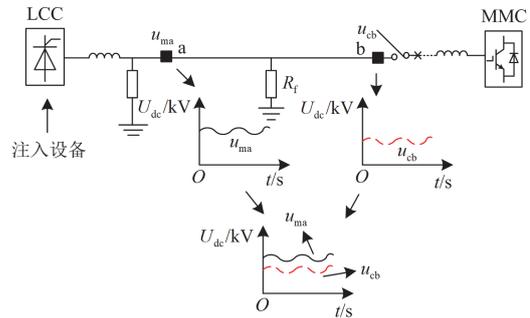


图 5 永久性故障时本端电压测量值与对端电压计算值

Fig. 5 Measured value of local end voltage and calculated value of remote end voltage with permanent fault

综上，瞬时性故障时由于信号注入后故障支路不存在，因此本端电压测量值与对端电压计算值幅值近似相等。永久性故障下由于信号注入后故障支路存在，因此本端电压测量值与对端电压计算值的幅值差异较大。本文基于本端电压测量值与对端电压计算值的幅值差异特征实现永久性故障识别。

2 注入信号策略

2.1 注入信号的产生

混合多端直流输电系统正常运行时，LCC 侧采用定电流控制，MMC 侧分别采用定电压控制和定有功功率控制。直流线路发生故障后，LCC 将进行紧急移相或改变定电流控制参考值^[22]，实现故障限流，MMC 侧采用故障限流策略之后进行故障隔离。

目前利用 LCC 实现特征信号注入的研究较少，但也有部分文献进行了初步探索。文献[19-20]通过 LCC 注入电流信号，文献[21]通过 LCC 注入电压信号。现有 LCC 注入信号控制框图如图 6 所示。

图 6 中： I_{dcn} 为正常运行时定电流控制直流电流参考值； I_{dc} 为直流电流实测值； $I_{dc\text{ref}}$ 为不同控制策略下最终的直流电流参考值； $I_{dc\text{set}}$ 为文献[19-20]

注入信号阶段直流电流设定值; I_{dcset1} 为文献[19]故障限流阶段直流电流设定值; α_{ref} 为触发角参考值; α_{set} 为文献[20-21]故障限流阶段触发角设定值; α_{set1} 为文献[21]注入信号阶段触发角设定值; α 为最终输出的触发角。

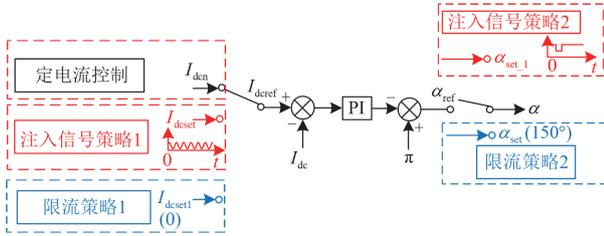


图 6 现有 LCC 注入信号控制策略

Fig. 6 Existing LCC injection signal control strategy

如图 6 所示,正常运行时 LCC 采用定电流控制,故障发生后,文献[19]通过将定电流控制参考值设置为 0 实现故障限流,文献[20]通过紧急移相将触发角增大到 90° 以上实现故障限流,之后二者均通过改变定电流控制参考值的方式注入电流信号。考虑到晶闸管的单向导通性,在电流注入阶段,为保证电流方向不变,上述注入方法直流电流参考值均需加入直流分量,如式(1)所示。

$$I_{dcset} = A + B \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: A 为直流分量幅值; B 为注入信号幅值; ω 为注入信号角频率; φ 为注入信号初始相位。

文献[21]通过紧急移相实现故障限流,之后通过短时阶跃改变触发角实现电压信号注入。

LCC 侧采用定电流控制时,通过直流电流参考值与实测值的偏差量来驱动 PI 控制进行调节,从而得到相应的触发角 α 。因此本文通过改变 LCC 触发角的方式实现特征信号注入。由于在直流系统中注入交流信号系统响应特征更加明显,因此采用正弦改变 LCC 侧触发角的方式注入交流信号。

对于故障限流策略,文献[19]通过将电流参考值设置为 0 实现故障限流,之后经 PI 控制得到触发角,控制函数如式(2)所示。

$$\frac{d\alpha}{dt} = K_p \frac{d(I_{dref} - I_{dc})}{dt} + \frac{1}{K_i} (I_{dref} - I_{dc}) \quad (2)$$

式中: K_p 为 PI 调节器的比例系数; K_i 为 PI 调节器的积分时间常数。

文献[20-21]通过直接改变触发角实现故障限流,省去 PI 控制时间,能够更快地将故障电流限制为 0。两种故障限流策略效果如图 7 所示。

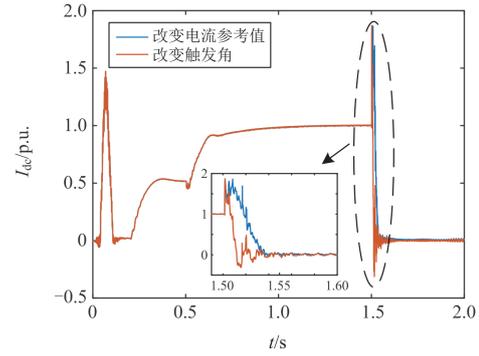


图 7 不同控制策略故障限流效果

Fig. 7 Fault current limiting effect of different control strategies

由图 7 可得,通过改变触发角的故障限流策略能够更快地将电流限制为 0,因此本文通过改变触发角进行紧急移相实现故障限流。

综上,本文采用的 LCC 注入信号策略如图 8 所示。

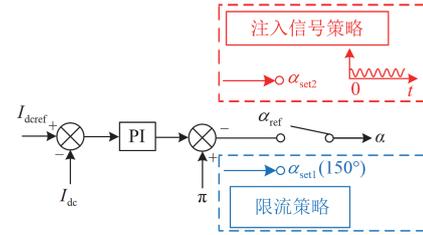


图 8 LCC 注入信号策略

Fig. 8 Injection signal strategy of LCC

图 8 中: α_{set1} 为故障限流阶段触发角设定值; α_{set2} 为注入信号阶段触发角设定值。

对于 LCC 换流器,极对地直流电压 U_{dc} 可表示为式(3)。

$$U_{dc} = N(1.35U_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dc}) \quad (3)$$

式中: N 为每极中的 6 脉动换流器数,本文使用 12 脉动换流器,取 $N=2$; U_1 为换流变压器阀侧空载线电压有效值,本文为 210 kV; X_r 为换向电抗。

由式(3)可知,通过改变触发角可以注入电压信号,因此本文使用电压作为研究对象。

当故障发生时,LCC 侧触发故障限流策略,将故障电流限制为 0,本文设置触发角 α 为 150° ,如式(4)所示。

$$\alpha = \alpha_{set1} = 150^\circ \quad (4)$$

故障发生后,系统经 150 ms 固定延时(即去游离时间,一般为 100~300 ms)^[8]进入系统恢复阶段,此时 LCC 由故障限流控制策略切换到信号注入控

制策略，即通过改变触发角实现信号注入。

2.2 注入信号频率

选择注入信号频率时应考虑信号传输效果、测量装置的采样频率、换流器的频率输出能力等因素。具体分析如下所述。

1) 信号传输效果。需考虑注入信号传输过程中的衰减因素，线路传输系数如式(5)所示。

$$A(j\omega) = \exp[-\gamma(j\omega)l] \quad (5)$$

式中： l 为线路长度； γ 为传播系数， $\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ ，其中 G_0 为线路单位长度的电导。

考虑到本文所使用线路长度约为 1500 km，根据式(5)绘制 1500 km 架空线路下典型线路传输衰减曲线，如图 9 所示。

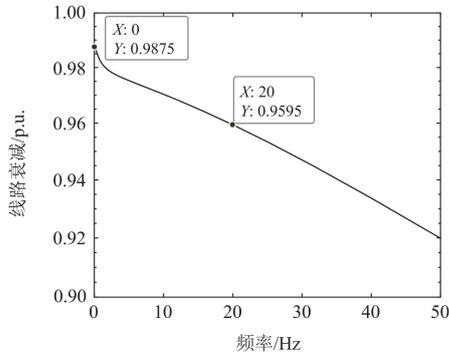


图 9 线路传输衰减曲线

Fig. 9 Line transmission attenuation

由图 9 可得，注入信号频率越高，信号衰减越严重，因此注入信号频率不宜过高。

2) 测量装置采样频率。在实际工程中，保护测量装置采样频率一般在 10~50 kHz 之间^[11]，注入频率应远低于测量装置采样频率，以保证装置能够有效地获取注入信号。

3) 换流器频率输出能力。本文使用 12 脉动换流器，不同频率注入信号效果如图 10 所示。

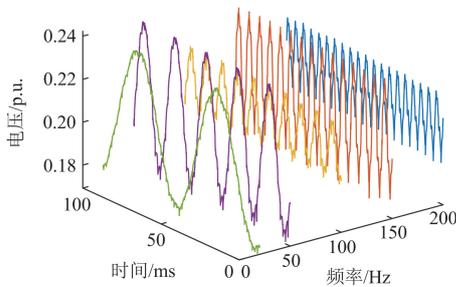


图 10 不同频率注入信号效果

Fig. 10 Effect of different frequency injection signals

由图 10 可得，受制于换流器的输出能力，注入信号的质量随着频率增加而逐渐变差。同时考虑到 12 脉波换流器将输出 12 倍整数次谐波，注入信号频率要避免谐波频率。

4) 考虑到本文使用分布参数模型进行分析，线路长度为 1500 km，因此对 1500 km 下双曲函数幅频特性进行分析，如图 11 所示。

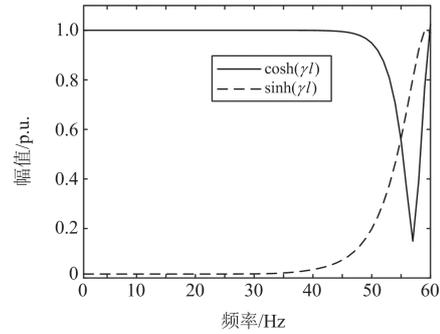


图 11 双曲函数幅频特性

Fig. 11 Amplitude frequency characteristics of hyperbolic function

由图 11 可知，双曲函数在低频段线性变化。此外，应用分布参数模型计算对端电气量时，只有使用 100 Hz 及以下的线路参数才能准确计算^[23]。因此，注入信号频率不宜过高。

5) 考虑本文需由本端电压计算对端电压，因此需考虑电压沿线分布误差，如式(6)所示^[24]。

$$E = 1 - \cos(\omega l / 2v) \quad (6)$$

式中： E 为电压分布误差； v 为波速。由式(6)可得，线路长度为 1500 km 时的误差曲线如图 12 所示。

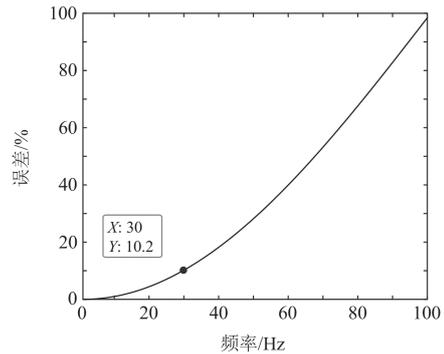


图 12 电压沿线分布误差

Fig. 12 Voltage distribution error along the line

由式(6)和图 12 可知，线路长度为 1500 km、频率为 30 Hz 时误差已达 10.2%，且随着频率增加误差增大，因此注入频率不应过高。

6) 直流滤波器谐振。注入信号频率应避免直流滤波器谐振频率，以免对直流滤波器运行造成影响。

图 13 所示为本文系统直流滤波器阻抗-频率特性曲线。由图 13 可知, 直流滤波器有多个串、并联谐振频率, 注入频率应避开图中串、并联谐振频率。

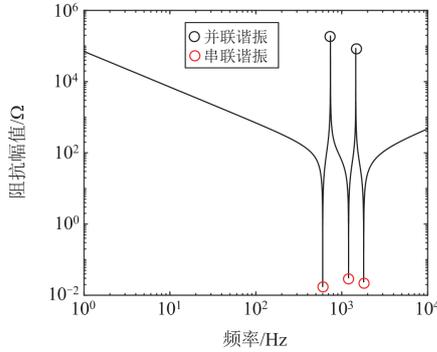


图 13 直流滤波器阻抗-频率特性

Fig. 13 Impedance-frequency characteristics of DC filter

7) 对系统的影响。正弦改变触发角频率过高可能导致设备短时过热, 影响系统稳定性。因此, 频率不宜过高。

综上所述, 本文选择注入信号的频率为 20 Hz。

2.3 注入信号时长

注入信号的时长需要考虑信号传输延时、系统短时恢复、信号采样周期等因素。具体分析如下。

1) 信号传输延时。信号传输波速表达式如式(7)^[19]所示。

$$v = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2}[\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}]}} \quad (7)$$

根据式(7), 考虑到本文所使用线路总长度约为 1500 km, 可得信号在线路中的传输时长约为 7.5 ms。注入信号时长应大于信号传输延时。

2) 系统短时恢复。为提高供电可靠性, 系统应在短时间内恢复, 减少停电时间, 因此注入信号时长不宜过长。工程中恢复过程去游离时间一般设置为 100~300 ms, 重启次数设置为 0~5 次, 系统恢复需要几秒甚至更久。

3) 信号采样周期。根据奈奎斯特定理可知, 要准确提取信号, 至少需要特征频率的 2 倍长度。考虑到本文选择注入信号频率为 20 Hz, 则一个采样周期为 50 ms, 2 倍长度即为 100 ms。

4) 滤波器延时。本文使用 50 阶 FIR 低通滤波器提取时域波形, 滤波器延时计算如式(8)所示。

$$t = \frac{n}{f_s} \quad (8)$$

式中: n 为滤波器阶数; f_s 为系统采样频率。由式

(8)可得, 系统采样频率为 10 kHz 时, 滤波器延时为 5 ms, 注入信号时长应大于滤波器延时。

5) 对系统的影响。换流器运行在大触发角(50°以上)时, 换流站的主要设备运行条件恶化, 寿命会相应降低, 换流站干扰水平也会升高^[25]。因此信号注入时长不宜过长。

6) 互感器传输延时。目前国家标准 GB/T 26217-2019 中规定直流电子式电压互感器的传输延时不大于 500 μs^[26], 注入时长应大于互感器传输延时。

综上所述, 为保证注入信号效果, 注入信号时长设置为 150 ms。

2.4 注入信号幅值

注入信号的幅值需要考虑互感器的测量精度、对注入设备的影响等因素。具体分析如下所述。

1) 互感器的测量精度。必须保证注入信号的幅值大于互感器测量值的下限。以电子式互感器为例, 注入信号的幅值应大于 0.05 p.u.^[27]。由式(3)可知, 触发角改变范围需小于 87°, 且触发角越小, 注入电压幅值越高, 会对系统运行造成影响, 因此触发角不宜过低。建议设置触发角正弦改变范围为 83°~85°。

2) 对注入设备的影响。注入电压信号时会在直流线路中产生注入电流, 导致桥臂中产生注入电流分量。由于触发角越小, 注入电压幅值越高, 因此系统阻抗一定时, 注入电流分量幅值较高。

桥臂电流分量由注入信号分量和原有交流分量组成, 应保证桥臂电流不超过其最大承受范围, 以免对设备造成二次冲击。晶闸管 5 s 的过负荷能力可达 1.3 倍额定电流^[25]。桥臂电流表达式为

$$\begin{cases} I_{arm} \leq I_{arm}^{max} \\ I_{arm} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_{ac}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_{arm} 为桥臂电流; I_{arm}^{max} 为桥臂电流最大值; I_{ac} 为交流电流实测值。

系统正常运行时, LCC 侧实测额定直流电流、额定交流电流仿真图如图 14 所示。

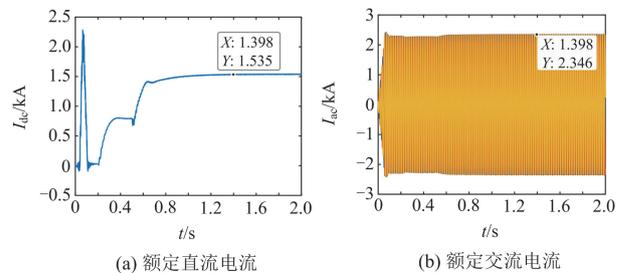


图 14 系统正常运行时 LCC 侧额定直流电流、交流电流

Fig. 14 Rated DC current and AC current at LCC side during normal system operation

由图 14 可得,系统正常运行时实测额定直流电流为 1.535 kA,额定交流电流为 2.346 kA。由式(9)可得桥臂电流额定值约为 1.685 kA,由于晶闸管 5 s 的过负荷能力可达 1.3 倍额定电流,因此桥臂可承受电流最大值约为 2.191 kA。

触发角正弦改变范围为 83°~85°时,最严重故障情况(即直流线路首端故障)下注入信号阶段 LCC 侧直流电流、交流电流仿真图如图 15 所示。

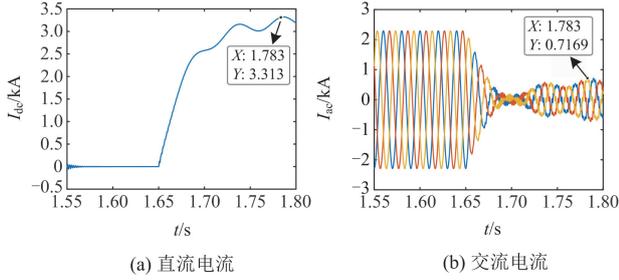


图 15 注入信号阶段 LCC 侧直流电流、交流电流
Fig. 15 DC current and AC current at LCC side during injection signal stage

由图 15 可知,实测直流电流为 3.313 kA、交流电流为 0.7169 kA 时桥臂电流达到最大值,由式(9)可得,此时桥臂电流约为 1.463 kA,在可承受范围内。触发角继续减小时,直流峰值电流会增大,可能超过桥臂电流承受范围,故触发角不宜过低。

综上所述,为保证注入信号效果,选择触发角正弦改变范围为 83°~85°。

采用上述注入信号频率、时长、幅值得到的触发角与直流电压响应如图 16 所示。

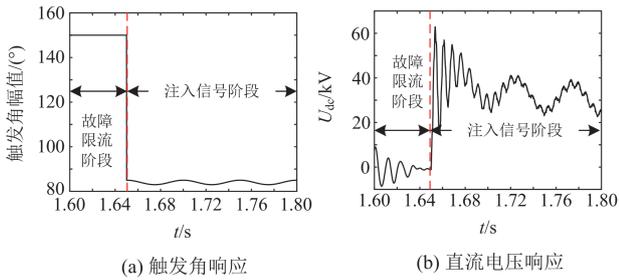


图 16 触发角与直流电压响应
Fig. 16 Trigger angle and DC voltage response

由上述分析可知,本文所提注入信号方法无需经过 PI 调节,具有更快的响应速度。

3 注入信号在分布参数模型下的差异性特征分析

为提高系统恢复的可靠性,需对混合多端直流输电系统故障性质进行识别。对于混合多端直流输

电系统,其故障区域可以分为 3 个部分,分别为直流线路 L₁ 故障、直流线路 L₂ 故障和直流母线(T 区)故障,如图 17 所示。

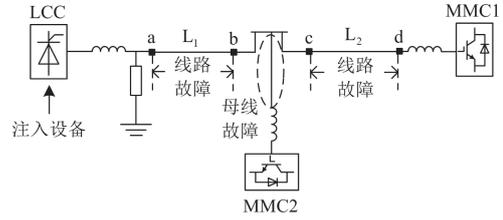


图 17 故障区域
Fig. 17 Fault area

当直流母线发生故障时,识别为永久性故障,需要闭锁换流器,当直流线路 L₁、L₂ 发生故障时,需要进一步识别故障性质。

本节以直流线路 L₁ 故障为例,分析 LCC 信号注入后不同故障性质下的差异性。

3.1 瞬时性故障

本文系统为真双极系统,以单极接地故障为例进行分析。故障发生经固定延时后,MMC1 和 MMC2 保持故障限流控制策略,LCC 由故障限流控制策略切换到注入信号控制策略。由于直流输电线路较长,其分布电容电流的影响不可忽略,因此本文引入分布参数模型进行分析。线路 L₁ 发生瞬时性故障时,其分布参数等效电路如图 18 所示。

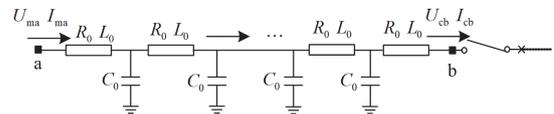


图 18 瞬时性故障时分布参数等效电路图
Fig. 18 Distributed parameters equivalent circuit with temporary fault

图 18 中: U_{ma} 、 I_{ma} 分别为注入信号阶段 a 端的电压、电流测量值; U_{cb} 、 I_{cb} 分别为注入信号阶段 b 端的电压、电流计算值。

由图 18 可得,瞬时性故障下 a 端测量值与 b 端计算值满足以下关系。

$$\begin{cases} U_{cb} = U_{ma} \cosh(\gamma l) - I_{ma} Z_c \sinh(\gamma l) \\ I_{cb} = I_{ma} \cosh(\gamma l) - \frac{U_{ma}}{Z_c} \sinh(\gamma l) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \cosh(\gamma l) = 0.5(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) \\ \sinh(\gamma l) = 0.5(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: Z_c 表示波阻抗。

此时, a 端电压测量值与 b 端电压计算值幅值差如式(12)所示。

$$U_{ma} - U_{cb} = U_{ma} - U_{ma} \cosh(\gamma l) + I_{ma} Z_c \sinh(\gamma l) \quad (12)$$

由图 11 可得, 在注入信号频率(即 20 Hz)时, $\cosh(\gamma l)$ 约为 1, $\sinh(\gamma l)$ 约为 0。因此考虑线路损耗, 可得 a 端电压测量值与 b 端电压计算值关系如式(13)所示。

$$U_{ma} \approx U_{cb} \quad (13)$$

考虑到相比于频域算法, 时域算法计算更加简单、快速且所需数据窗长更短, 因此将式(10)中的频域分布参数模型转换为时域分布参数模型, 如式(14)所示。

$$u_{cb}(l, t) = \frac{1}{2} \left| \frac{Z_c + \frac{R_0 l}{4}}{Z_c} \right|^2 \left[u_{ma} \left(t + \frac{l}{v} \right) - i_{ma} \left(t + \frac{l}{v} \right) \left(Z_c + \frac{R_0 l}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \left| \frac{Z_c - \frac{R_0 l}{4}}{Z_c} \right|^2 \left[u_{ma} \left(t - \frac{l}{v} \right) - i_{ma} \left(t - \frac{l}{v} \right) \left(Z_c - \frac{R_0 l}{4} \right) \right] - \left(\frac{R_0 l}{4 Z_c} \right)^2 u_{ma}(t) - \frac{R_0 l}{4} \left[\frac{Z_c + \frac{R_0 l}{4}}{Z_c} \right] \left[\frac{Z_c - \frac{R_0 l}{4}}{Z_c} \right] i_{ma}(t) \quad (14)$$

式中: $u_{ma}(t)$ 、 $i_{ma}(t)$ 分别为 LCC 侧保护安装处电压、电流时域信息。

时域下瞬时性故障时 a 端电压测量值与 b 端电压计算值示意图如图 19 所示。

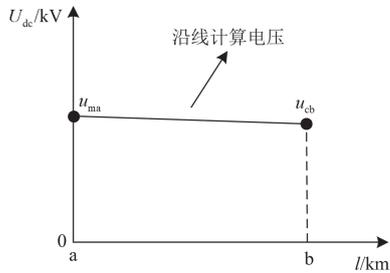


图 19 瞬时性故障时 a 端电压测量值与 b 端电压计算值

Fig. 19 Measured value of a-end voltage and calculated value of b-end voltage with temporary fault

3.2 永久性故障

当线路 L_1 发生永久性故障时, 其分布参数等效电路如图 20 所示。

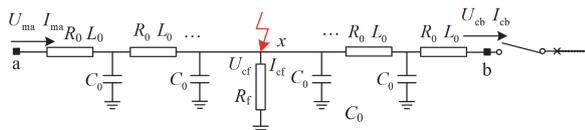


图 20 永久性故障时分布参数等效电路图

Fig. 20 Distributed parameters equivalent circuit with permanent fault

图 20 中: U_{cf} 、 I_{cf} 分别为永久性故障时故障点电压、电流计算值; x 为故障发生位置。

由图 20 可知, 永久性故障下由故障点计算得到 b 端电压、电流计算值如式(15)所示。

$$\begin{cases} U_{cb} = U_{cf} \cosh(\gamma(l-x)) - I_{cf} Z_c \sinh(\gamma(l-x)) \\ I_{cb} = I_{cf} \cosh(\gamma(l-x)) - \frac{U_{cf}}{Z_c} \sinh(\gamma(l-x)) \\ U_{cf} = U_{ma} \cosh(\gamma x) - I_{ma} Z_c \sinh(\gamma x) \\ I_{cf} = I_{ma} \cosh(\gamma x) - \frac{U_{ma}}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)进行变换可得式(16)。

$$\begin{cases} U_{cb} = U_{ma} \cosh(\gamma l) - I_{ma} Z_c \sinh(\gamma l) \\ I_{cb} = I_{ma} \cosh(\gamma l) - \frac{U_{ma}}{Z_c} \sinh(\gamma l) \end{cases} \quad (16)$$

可得 a 端电压测量值与 b 端电压计算值满足式(17)所示的关系。

$$U_{cb} < U_{ma} \quad (17)$$

永久性故障时电压时域表达式与瞬时性故障时类似, 此处不再赘述。

以下分别对永久金属性接地故障和经过渡电阻接地故障时 a 端电压测量值与 b 端电压计算值差异性进行分析。

在发生永久金属性接地故障时, 故障点与大地直接相连, 如图 21 所示。受故障点注入电流影响, 此时 b 端电压计算值在故障点之前是真实的, 之后是虚假的, 其时域示意图如图 22 所示。

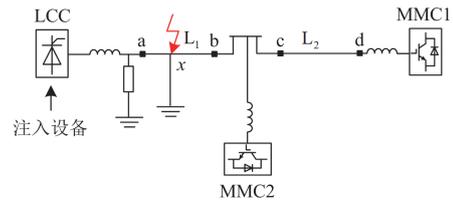


图 21 永久金属性接地故障时系统拓扑

Fig. 21 System topology of permanent metallic pole-to-ground fault

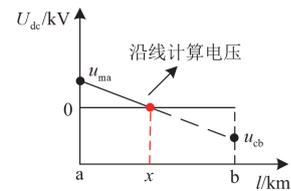


图 22 永久金属性接地故障时 a 端电压测量值与 b 端电压计算值

Fig. 22 Measured value of a-end voltage and calculated value of b-end voltage with permanent metallic pole-to-ground fault

当发生永久性经过渡电阻接地故障时，系统拓扑如图 23 所示。由于故障点过渡电阻对电压具有支撑作用，因此过渡电阻越高，b 端电压计算值越接近 a 端电压测量值。与金属性接地故障类似，b 端电压计算值在故障点之前是真实的，之后是虚假的，其时域示意图如图 24 所示。

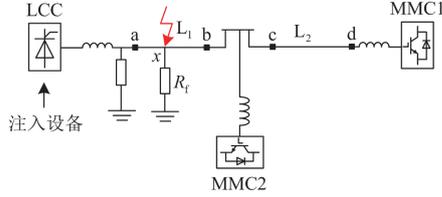


图 23 永久性经过渡电阻接地故障时系统拓扑
Fig. 23 System topology of permanent pole-to-ground fault with fault impedance

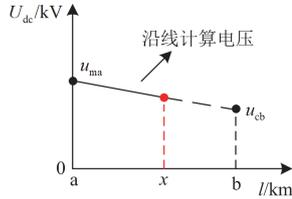


图 24 永久性经过渡电阻接地故障时 a 端电压测量值与 b 端电压计算值
Fig. 24 Measured value of a-end voltage and calculated value of b-end voltage with permanent pole-to-ground fault with fault impedance

此外，由于直流正负极线路之间存在耦合，需先对正负极进行解耦分析，在模域下进行计算，最终再通过解耦反变换得到相量域。保护安装处电压、电流解耦后的 1 模、0 模分量分别如式(18)、式(19)所示。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{正} \\ U_{负} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{正} \\ I_{负} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中：下标“1”、“0”分别表示 1 模量和 0 模量；“正”、“负”分别表示正极和负极的电气量。

计算完成后，通过式(20)所示的解耦反矩阵得到极量。

$$\mathbf{X} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

4 永久性故障识别方案

4.1 故障识别方案

由上述分析可知，瞬时性故障时故障特征确定，

线路模型为无故障模型，由于存在线路损耗，因此对端电压计算值略低于本端电压测量值，如图 25 所示。

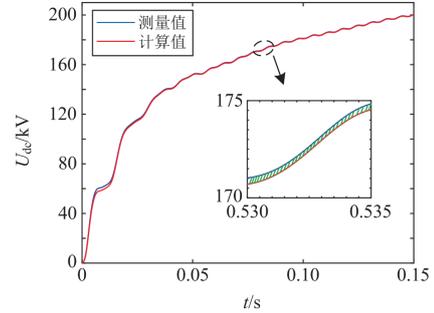


图 25 瞬时性故障时本端电压测量值与对端电压计算值
Fig. 25 Measured value of local end voltage and calculated value of remote end voltage with temporary fault

永久性故障时由于故障支路的存在，对电气量传输造成影响，故障特征不确定，线路模型为故障模型，因此本端电压测量值与对端电压计算值幅值存在较大差异，且对端电压计算值小于本端电压测量值，如图 26 所示。

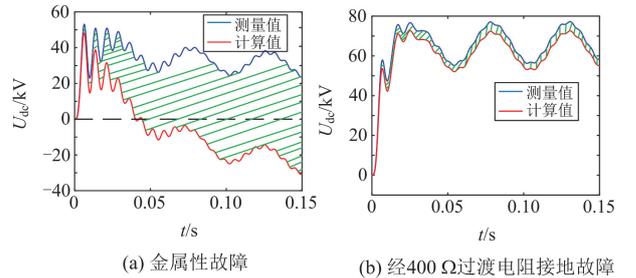


图 26 永久性故障时本端电压测量值与对端电压计算值
Fig. 26 Measured value of local end voltage and calculated value of remote end voltage with permanent fault

综上，考虑到不同故障性质下本端电压测量值与对端电压计算值的幅值差异性，本文利用二者面积差(即图 25 和图 26 中阴影部分面积)的绝对值实现永久性故障识别，为方便整定，将时间轴归一化为 0~1，选择本端电压测量值为标准，对直流电压进行归一化处理，如式(21)所示。

$$\begin{cases} u'_m = \frac{u_m}{u_m} \\ u'_c = \frac{u_c}{u_m} \end{cases} \quad (21)$$

式中： u'_m 、 u'_c 分别为归一化后的本端电压测量值和对端电压计算值； u_m 、 u_c 分别为归一化前的本端电压测量值和对端电压计算值。

定义归一化面积差 S 如式(22)所示。

$$S = |S_m - S_c| = \left| \int_0^1 (u'_m - u'_c) dt \right| \quad (22)$$

式中: S_m 为本端电压测量值面积; S_c 为对端电压计算值面积; 0 为归一化后的注入信号起始时刻; 1 为归一化后的注入信号结束时刻。

瞬时性故障下, 本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异较小, 归一化面积差 S 较小; 永久性故障下, 本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异较大, 归一化面积差 S 较大。因此, 可得永久性故障识别判据如式(23)所示。

$$\begin{cases} S \geq S_{set}, & \text{永久性故障} \\ S < S_{set}, & \text{瞬时性故障} \end{cases} \quad (23)$$

式中: S_{set} 为整定值。

线路传输衰减会对电气量传输幅值造成影响, 因此考虑其影响对 S_{set} 值的选择分析如下: 线路长度为 1500 km 时线路传输衰减如图 9 所示。由图 9 可知, 注入信号为 20 Hz 及以下时, 线路电气量幅值衰减低于 0.03 p.u.。由于经过归一化处理, 因此 S_{set} 值可设为 0.03。此外, 考虑一定裕度, 设置可靠系数 $K = 1.2$, 得整定值 S_{set} 如式(24)所示。

$$S_{set} = 0.03K = 0.036 \quad (24)$$

综上, S_{set} 设为 0.036。

4.2 故障识别方案流程图

永久性故障识别方案流程图如图 27 所示。

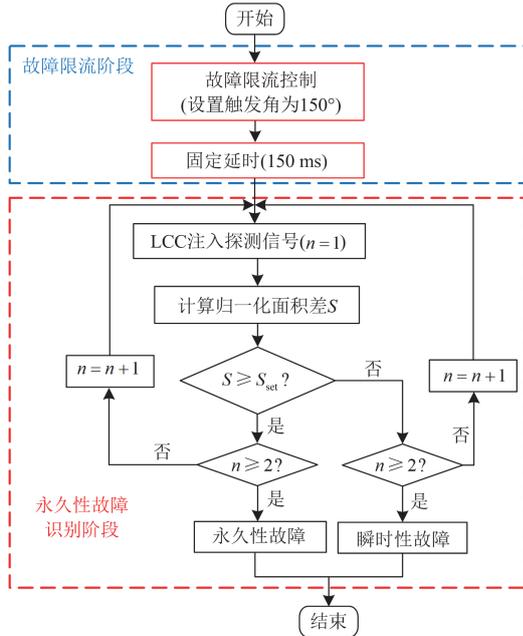


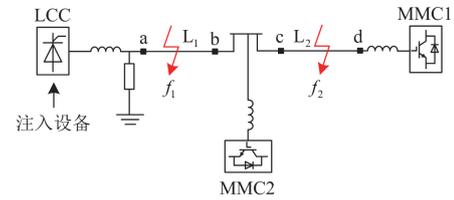
图 27 永久性故障识别方案流程图

Fig. 27 Flow chart of permanent fault identification scheme

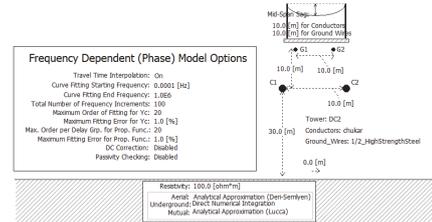
故障发生后, 系统切换为故障限流控制策略, LCC 侧触发角紧急移相为 150° , 经 150 ms 固定延时后 LCC 切换为注入信号策略, 通过改变 LCC 触发角注入特征信号, 之后计算归一化面积差 S , 与 S_{set} 进行比较实现永久性故障识别。为提高永久性故障识别的可靠性, 可多次注入信号, 本文注入次数设为 2 次。

5 仿真验证

在 PSCAD 中建立混合三端直流输电系统电磁暂态模型, 并使用 Matlab 对永久性故障识别方案进行验证。线路为依频参数模型, 系统拓扑和具体参数分别见图 28 和表 1。故障发生时刻为 1.5 s, 瞬时性故障持续时间为 0.1 s, 系统采样频率为 10 kHz。



(a) 混合多端直流输电系统拓扑图



(b) 依频参数模型

图 28 混合多端直流输电系统

Fig. 28 Hybrid multi-terminal HVDC system

表 1 混合多端直流输电系统参数

Table 1 Parameters of hybrid multi-terminal HVDC system

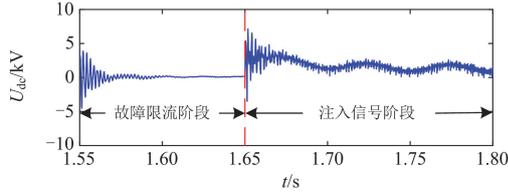
参数名称	数值
LCC 容量/MVA	800
MMC 容量/MVA	400
额定直流电压/kV	500
LCC 出口平波电抗器电抗/mH	300
MMC 出口限流电抗器电抗/mH	150
线路 L_1 长度/km	950
线路 L_2 长度/km	550

5.1 永久性故障识别仿真结果分析

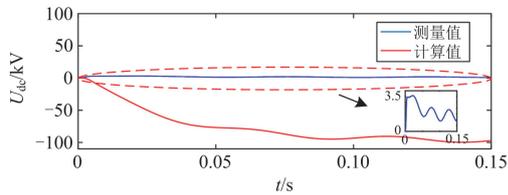
以单极金属性接地故障为例, 对所提永久性故障识别方案进行仿真验证。以线路 L_1 上的故障 f_1 和线路 L_2 上的故障 f_2 为例, 线路 L_1 上的故障分别距 a

端 15 km、475 km、935 km (f_{1-15} 、 f_{1-475} 、 f_{1-935})，线路 L_2 上的故障分别距 c 端 15 km、275 km、535 km (f_{2-15} 、 f_{2-275} 、 f_{2-535})。线路 L_1 故障时本端电压测量值与对端电压计算值如图 29—图 34 所示，永久性故障识别结果如表 2 所示，表 2 中 P 表示永久性故障，T 表示瞬时性故障。

由图 29—图 34 可知，瞬时性故障时在注入信号时段内电压呈上升趋势且幅值较高，永久性故障



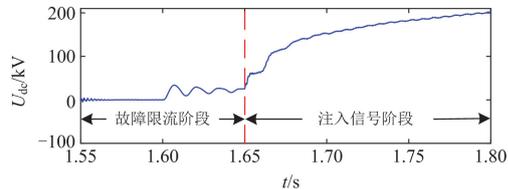
(a) 注入信号效果图



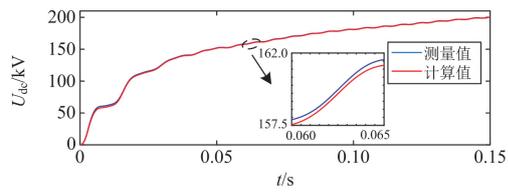
(b) 测量值与计算值

图 29 永久单极金属性接地故障 (f_{1-15})

Fig. 29 Permanent pole-to-ground metallic fault (f_{1-15})



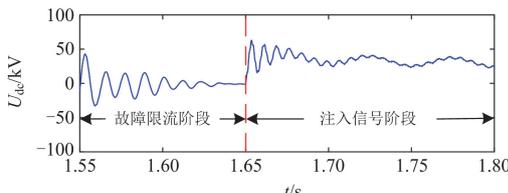
(a) 注入信号效果图



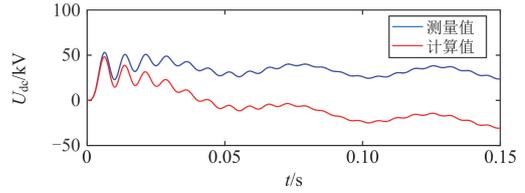
(b) 测量值与计算值

图 30 瞬时单极金属性接地故障 (f_{1-15})

Fig. 30 Temporary pole-to-ground metallic fault (f_{1-15})



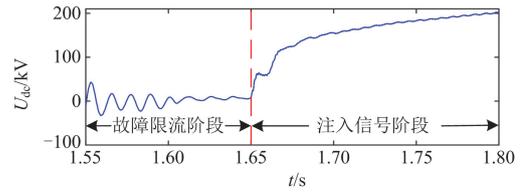
(a) 注入信号效果图



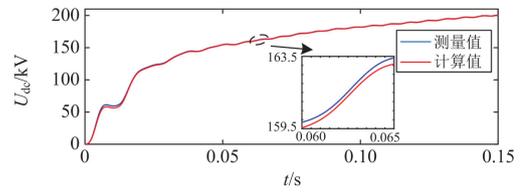
(b) 测量值与计算值

图 31 永久单极金属性接地故障 (f_{1-475})

Fig. 31 Permanent pole-to-ground metallic fault (f_{1-475})



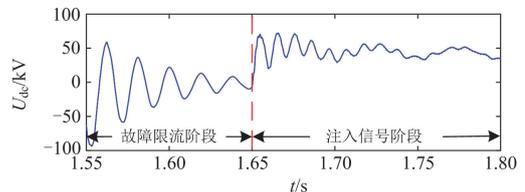
(a) 注入信号效果图



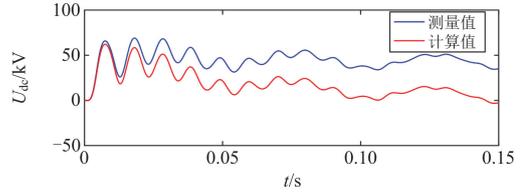
(b) 测量值与计算值

图 32 瞬时单极金属性接地故障 (f_{1-475})

Fig. 32 Temporary pole-to-ground metallic fault (f_{1-475})



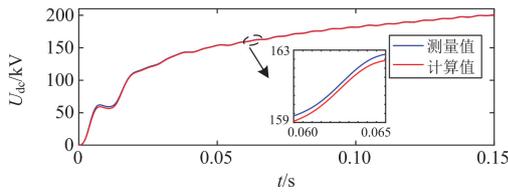
(a) 注入信号效果图



(b) 测量值与计算值

图 33 永久单极金属性接地故障 (f_{1-935})

Fig. 33 Permanent pole-to-ground metallic fault (f_{1-935})



(b) 测量值与计算值

图 34 瞬时单极金属性接地故障(f_{1-935})

Fig. 34 Temporary pole-to-ground metallic fault (f_{1-935})

表 2 单极金属性接地故障识别结果

Table 2 Identification results of the pole-to-ground metallic fault

故障位置	故障类型	归一化面积差 S	识别结果
f_{1-15}	P	51.7508	P
	T	0.0055	T
f_{1-475}	P	1.2091	P
	T	0.0067	T
f_{1-935}	P	0.6114	P
	T	0.0062	T
f_{2-15}	P	28.0575	P
	T	0.0017	T
f_{2-275}	P	1.2489	P
	T	0.0027	T
f_{2-535}	P	0.7601	P
	T	0.0017	T

时,在注入信号时段内电压呈正弦变化且幅值较低,与第 1 节分析相符。

由图 29—图 34 和表 2 数据可知,永久性故障时本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异较大,归一化面积差大于 0.036,瞬时性故障时本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异较小,归一化面积差小于 0.036,所提方案能够有效识别永久性故障,且不受故障位置影响。

5.2 过渡电阻影响分析

为充分验证过渡电阻对本文所提方法性能的影响,以正极接地故障为例,设置过渡电阻分别为 100 Ω 、200 Ω 、300 Ω 、400 Ω ,线路 L_1 上的故障分别距 a 端 15 km、475 km、935 km (f_{1-15} 、 f_{1-475} 、 f_{1-935}),线路 L_2 上的故障分别距 c 端 15 km、275 km、535 km (f_{2-15} 、 f_{2-275} 、 f_{2-535})。永久性故障识别结果如图 35—图 38 所示。

由图 35—图 38 可知,永久性故障时归一化面积差大于 0.036,瞬时性故障时归一化面积差小于 0.036,所提方法能够有效识别永久性故障,具有较强的耐过渡电阻能力。

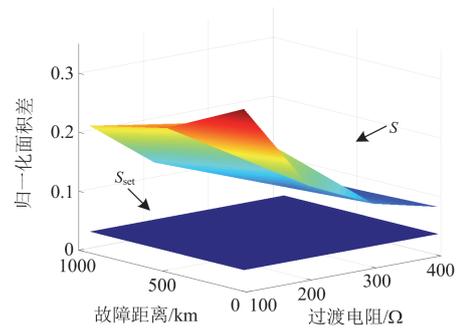


图 35 线路 L_1 永久性故障

Fig. 35 Permanent fault of line L_1

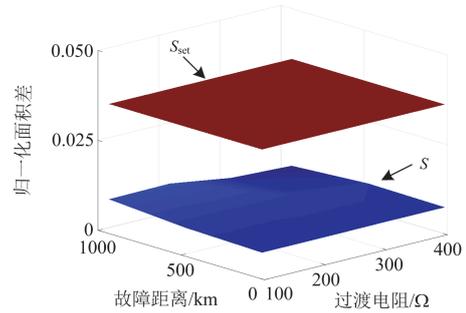


图 36 线路 L_1 瞬时性故障

Fig. 36 Temporary fault of line L_1

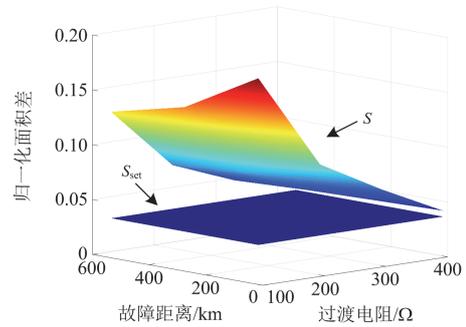


图 37 线路 L_2 永久性故障

Fig. 37 Permanent fault of line L_2

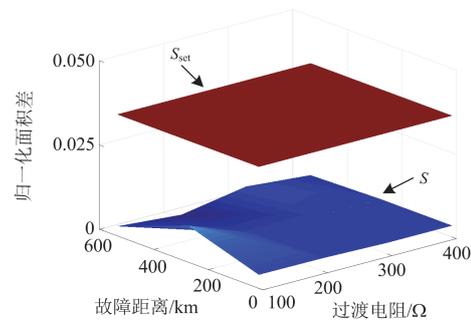
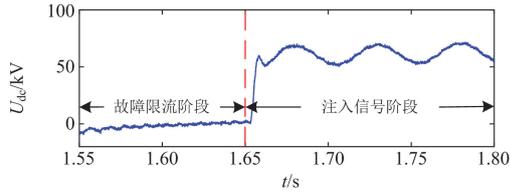


图 38 线路 L_2 瞬时性故障

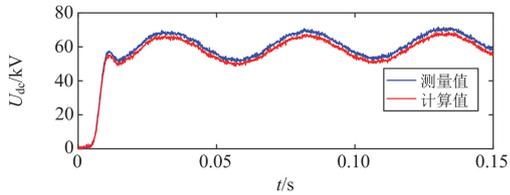
Fig. 38 Temporary fault of line L_2

5.3 噪声干扰影响分析

为充分验证噪声干扰对本文所提方法性能的影响,以正极接地故障为例,在数据中加入信噪比为40 dB的噪声,设置过渡电阻为400 Ω,在线路L₁上的故障分别距a端15 km、475 km、935 km(f_{1-15} 、 f_{1-475} 、 f_{1-935}),线路L₂上的故障分别距c端15 km、275 km、535 km(f_{2-15} 、 f_{2-275} 、 f_{2-535})。线路L₂故障时本端电压测量值与对端电压计算值如图39—图44所示,含噪声干扰下的永久性故障识别结果如表3所示。

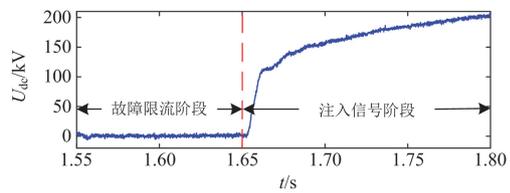


(a) 注入信号效果图

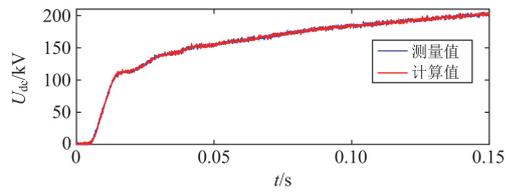


(b) 测量值与计算值

图 39 永久性故障(f_{2-15})
Fig. 39 Permanent fault (f_{2-15})

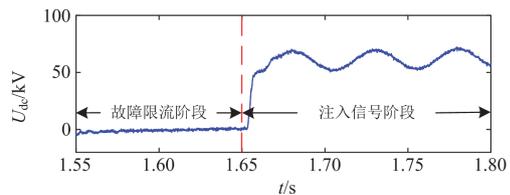


(a) 注入信号效果图

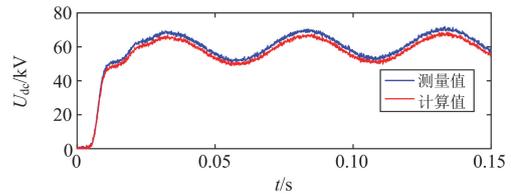


(b) 测量值与计算值

图 40 瞬时性故障(f_{2-15})
Fig. 40 Temporary fault (f_{2-15})

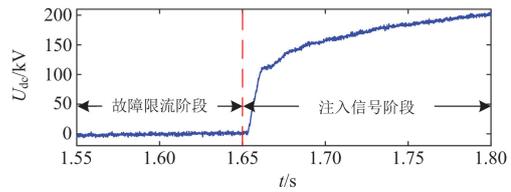


(a) 注入信号效果图

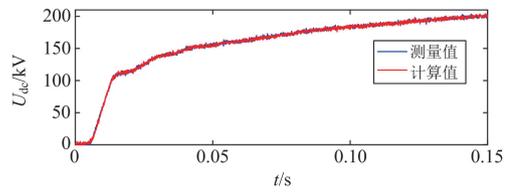


(b) 测量值与计算值

图 41 永久性故障(f_{2-275})
Fig. 41 Permanent fault (f_{2-275})

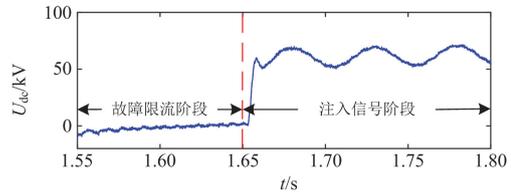


(a) 注入信号效果图

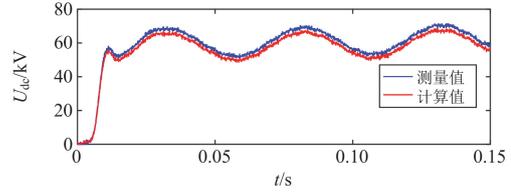


(b) 测量值与计算值

图 42 瞬时性故障(f_{2-275})
Fig. 42 Temporary fault (f_{2-275})

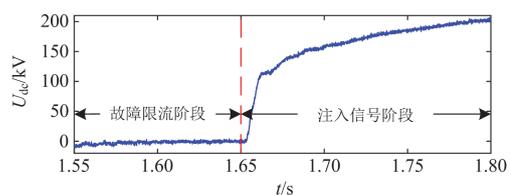


(a) 注入信号效果图

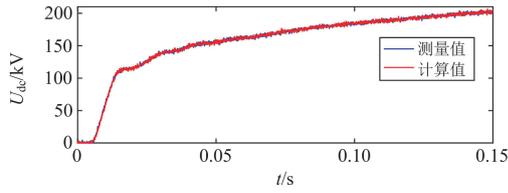


(b) 测量值与计算值

图 43 永久性故障(f_{2-535})
Fig. 43 Permanent fault (f_{2-535})



(a) 注入信号效果图



(b) 测量值与计算值

图 44 瞬时性故障 (f_{2-535})Fig. 44 Temporary fault (f_{2-535})

表 3 含噪声干扰下的识别结果

Table 3 Identification results with noise interference

故障位置	故障类型	归一化面积差 S	识别结果
f_{1-15}	P	0.0472	P
	T	0.0143	T
f_{1-475}	P	0.0471	P
	T	0.0092	T
f_{1-935}	P	0.0511	P
	T	0.0094	T
f_{2-15}	P	0.0530	P
	T	0.0233	T
f_{2-275}	P	0.0418	P
	T	0.0226	T
f_{2-535}	P	0.0458	P
	T	0.0171	T

由图 39—图 44 和表 3 数据可知, 永久性故障时归一化面积差大于 0.036, 瞬时性故障时归一化面积差小于 0.036, 所提方法在 40 dB 噪声干扰下能够有效识别永久性故障。

5.4 采样率影响分析

为充分验证采样率对本文所提方法性能的影响, 以线路 L_1 发生正极接地故障为例, 设置采样率为 5 kHz、20 kHz, 同时设置过渡电阻为 400 Ω , 线路 L_1 上的故障分别距 a 端 15 km、935 km (f_{1-15} 、 f_{1-935})。不同采样率下的永久性故障识别结果如表 4 所示。

表 4 不同采样率下的识别结果

Table 4 Identification results under different sampling intervals

采样率/kHz	故障位置	故障类型	归一化面积差 S	识别结果
5	f_{1-15}	P	0.0862	P
		T	0.0091	T
	f_{1-935}	P	0.0739	P
		T	0.0036	T
20	f_{1-15}	P	0.0800	P
		T	0.0066	T
	f_{1-935}	P	0.0721	P
		T	0.0058	T

由表 4 数据可知, 所提方法在不同采样率下能够有效识别永久性故障, 受采样率影响较小。

5.5 边界条件影响分析

为充分验证边界条件对本文所提方法性能的影响, 以线路 L_1 发生正极接地故障为例, 设置 LCC 侧平波电抗器分别为 100 mH、500 mH, 同时设置过渡电阻为 400 Ω , 线路 L_1 上的故障分别距 a 端 15 km、935 km (f_{1-15} 、 f_{1-935})。不同边界条件下的永久性故障识别结果如表 5 所示。

表 5 不同边界条件下的识别结果

Table 5 Identification results under different boundary conditions

平波电抗器	故障位置	故障类型	归一化面积差 S	识别结果
100 mH	f_{1-15}	P	0.0825	P
		T	0.0077	T
	f_{1-935}	P	0.1253	P
		T	0.0082	T
500 mH	f_{1-15}	P	0.0817	P
		T	0.0072	T
	f_{1-935}	P	0.0730	P
		T	0.0088	T

由表 5 数据可知, 所提方法在不同边界条件下能够有效识别永久性故障, 受直流边界衰减效应影响较小。

5.6 与现有方法比较

本文所提方法与现有方法比较如表 6 所示。

表 6 与现有方法比较结果

Table 6 Comparison results with existing schemes

方法	采样频率/kHz	是否依赖波前识别	是否依赖边界	是否依赖仿真整定
文献[7]	50	是	是	否
文献[13]	100	是	是	是
文献[19]	20	否	否	否
文献[20]	10	否	否	是
文献[21]	50	是	是	是
本文方法	≥ 5	否	否	否

由表 6 数据可知, 现有永久性故障识别方法较多依赖行波, 受采样率、直流边界影响较大, 利用 LCC 注入信号的方法部分依赖仿真整定, 而本文所提方法受采样率、直流边界影响较小, 且无需仿真整定。

5.7 在传统高压直流输电系统中的适用性验证

以图 45 所示高压直流输电系统为例, 对所提方法在传统高压直流输电系统中的适用性进行验证。线路模型为依频参数模型, 与图 28(b)一致, 线路长度为 1500 km, 设置过渡电阻为 400 Ω , 线路 L_1 上的故障分别距 a 端 15 km、375 km、750 km、1125 km、1485 km (f_{1-15} 、 f_{1-375} 、 f_{1-750} 、 f_{1-1125} 、 f_{1-1485}), 传统

高压直流输电系统永久性故障识别结果如表 7 所示。

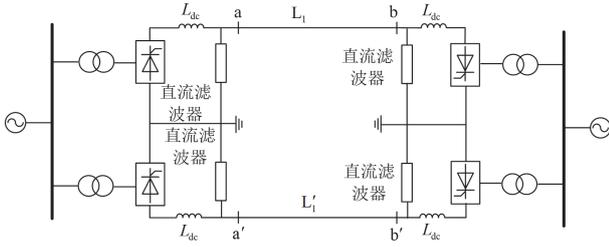


图 45 传统高压直流输电系统拓扑

Fig. 45 Topology of traditional HVDC system

表 7 传统高压直流输电系统的识别结果

Table 7 Identification results under traditional HVDC system

故障位置	故障类型	归一化面积差 S	识别结果
f_{1-15}	P	0.1273	P
	T	0.0134	T
f_{1-375}	P	0.1215	P
	T	0.0143	T
f_{1-750}	P	0.1181	P
	T	0.0125	T
f_{1-1125}	P	0.1120	P
	T	0.0133	T
f_{1-1485}	P	0.1095	P
	T	0.0103	T

由表 7 数据可知，所提方法在传统高压直流输电系统中能够有效识别永久性故障。

6 结论

针对混合多端直流输电系统，本文提出一种基于 LCC 注入信号的永久性故障识别方案。主要结论如下：

1) 所提方案在故障发生后通过紧急移相实现故障限流，经固定延时后通过正弦改变 LCC 侧触发角的方式注入电压信号，无需经过 PI 控制环节，具有更快的响应速度。

2) 所提方案利用不同故障性质下本端电压测量值与对端电压计算值幅值差异构造归一化面积差实现永久性故障识别，仅需使用单端数据，不受数据通信影响，且无需仿真整定。

3) 仿真结果表明，所提方案能够耐受 400 Ω 过渡电阻和 40 dB 噪声干扰，受故障距离、采样频率、直流边界影响较小，具有较强的鲁棒性。

4) 所提方案不仅适用于混合多端直流输电系统，同样适用于传统高压直流输电系统，且本方案采用分布参数模型，不受线路分布电容电流影响，适用于长距离输电线路，适用于 1500 km 及以下长度线路。

参考文献

- [1] 王玉麟, 李晓华, 李昊, 等. 一种抑制连续换相失败的定关断角加速控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 56-66.
WANG Yulin, LI Xiaohua, LI Hao, et al. A constant extinction angle acceleration control method for suppressing continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 56-66.
- [2] 俞翔, 鲁江, 董云龙, 等. 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 174-180.
YU Xiang, LU Jiang, DONG Yunlong, et al. A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 174-180.
- [3] 戴志辉, 石旭. 基于电压-电流采样轨迹的混合直流输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2179-2188.
DAI Zhihui, SHI Xu. A pilot protection for hybrid HVDC transmission lines based on voltage-current sampling trajectory[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2179-2188.
- [4] 张怿宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
ZHANG Yining, LUO Yiping, HONG Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [5] 李海锋, 许灿雄, 梁远升, 等. 计及换流站控制响应的多端混合直流线路后备保护设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 155-163.
LI Haifeng, XU Canxiong, LIANG Yuansheng, et al. Backup protection design for multi-terminal hybrid HVDC lines considering control response[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 155-163.
- [6] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3873-3885.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3873-3885.
- [7] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用健全极 MMC 注入特征信号的直流线路故障性质判别方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 994-1003.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. DC line fault identification based on characteristic signal injection using the MMC of sound pole[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 994-1003.
- [8] HOU J, SONG G, FAN Y. Fault identification scheme for protection and adaptive reclosing in a hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-17.

- [9] HOU J, SONG G, CHANG P, et al. Fault identification scheme for hybrid multi-terminal HVDC system based on control and protection coordination strategy[J]. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 2022, 136.
- [10] HOU J, SONG G, SUN Y, et al. Permanent fault identification and location scheme for MTDC grid based on equivalent impedance phase characteristics and distributed parameter line[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153.
- [11] WANG T, SONG G, HUSSAIN KST. Adaptive single-pole auto-reclosing scheme for hybrid MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2194-2203.
- [12] 蔡普成, 向往, 周猛, 等. 基于混合型 MMC 主动信号注入的直流故障自适应重合闸方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3867-3878.
CAI Pucheng, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive reclosing of DC fault based on active signal injected by hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3867-3878.
- [13] 黎钊, 郑宇超, 林湘宁, 等. 基于波形相似度特征的多端柔直电网故障自适应重合闸方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1326-1339.
LI Zhao, ZHENG Yuchao, LIN Xiangning, et al. Adaptive reclosing scheme for VSC-MTDC line based on the transient current waveform similarity matching[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1326-1339.
- [14] 杨赛昭, 向往, 杨睿璋, 等. 基于半桥型 MMC 和混合式 DCCB 的柔直系统直流故障自适应重合闸技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4440-4451, 4724.
YANG Saizhao, XIANG Wang, YANG Ruizhang, et al. Research on adaptive reclosing technology for the half-bridge MMC and hybrid DC circuit breaker based on HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4440-4451, 4724.
- [15] MEI J, GE R, ZHU P, G, et al. An adaptive reclosing scheme for MMC-HVDC systems based on pulse injection from parallel energy absorption module[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1809-1818.
- [16] HAN P, ZHAO X, WU Y, et al. Adaptive reclosing scheme based on traveling wave injection for multi-terminal DC grids[J]. Energy Engineering, 2023, 120(5): 1271-1285.
- [17] ZHANG S, ZOU G, XU C, et al. A reclosing scheme of hybrid DC circuit breaker for MMC-HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7126-7137.
- [18] 张大海, 杨宇辰, 梁晨光, 等. 基于改进直流断路器注入信号的柔直电网自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 123-132.
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIANG Chenguang, et al. Adaptive reclosing scheme for flexible DC power grid based on improved DC circuit breaker injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 123-132.
- [19] XU R, SONG G, HOU J, et al. Adaptive restarting method for LCC-HVDC based on principle of fault location by current injection[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 554-563.
- [20] HOU J, SONG G, FAN Y. Fault properties identification scheme for hybrid MTDC system based on LCC signal injection and distributed parameter line model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17: 3718-3738.
- [21] LIANG C, ZHANG D, LI M, et al. Waveform difference based adaptive restart strategy for LCC-MMC hybrid DC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5), 4237-4247.
- [22] 王蕾, 孙孝峰, 王宝诚, 等. LCC-MMC 混合高压直流输电系统直流线路故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7339-7352.
WANG Lei, SUN Xiaofeng, WANG Baocheng, et al. Research on protection scheme of DC line fault in LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7339-7352.
- [23] 宋国兵, 饶菁, 高淑萍, 等. 基于补偿电压的高压直流输电线路单端电气量保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 102-106, 113.
SONG Guobing, RAO Jing, GAO Shuping, et al. Monopole protection for HVDC transmission lines based on compensating voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 102-106, 113.
- [24] ZHENG J, WEN M, CHEN Y, et al. A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electric Power & Energy Systems, 2018, 94: 171-178.
- [25] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [26] 朱梦梦, 王登, 廖耀华, 等. 直流电子式电压互感器延时特性分析与现场测试[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 126-132.
ZHU Mengmeng, WANG Deng, LIAO Yaohua, et al. Field test and analysis of delay characteristics of a DC electronic voltage transformer[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 126-132.
- [27] 王鹏, 张贵新, 李莲子, 等. 电子式互感器误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(7): 1105-1108.
WANG Peng, ZHANG Guixin, LI Lianzi, et al. Error analysis of electronic instrument transformers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(7): 1105-1108.

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2024-08-21

作者简介:

高超(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1256394780@qq.com

侯俊杰(1993—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 826686025@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

(编辑 魏小丽)