

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221465

逆变站交流出线保护近区故障方向判别方法

肖繁¹, 柳丹¹, 熊平¹, 文明浩², 康逸群¹, 冀肖彤³

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 逆变站作为交直流混合电网的核心枢纽, 其故障特性相较于传统同步机更加复杂。逆变站交流出线发生故障时, 受逆变站故障特性影响, 传统基于工频量的保护无法正确动作。通过分析逆变站交流出线两端系统故障特性差异, 基于 R-L 模型时域微分方程算法, 提出了一种新型方向元件。当逆变站交流出线发生短路故障时, 直流系统侧提供的故障电流和受端交流系统提供的故障电流特性差异极大, 通过计算测量电压降落和计算电压降落变化趋势的相关系数, 所提方向元件可正确判断故障方向。分析表明, 所提出的方向元件适用于逆变站交流出线线路保护, 且在逆变站仅有一条出线的情况下仍能正确动作。仿真结果表明, 该方向元件具有良好的保护性能, 不受雷击、故障类型、逆变站换相失败等因素的影响。

关键词: 交直流混合电网; 交流线路; 方向元件; 相关系数

Fault direction identification for AC line near converter at the inverter side of HVDC

XIAO Fan¹, LIU Dan¹, XIONG Ping¹, WEN Minghao², KANG Yiqun¹, JI Xiaotong³

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: The converter station is a crucial node in the AC/DC hybrid power grid and has complex fault characteristics. Traditional protection methods based on power frequency components may not respond accurately to faults on the converter station's AC outlet, owing to converter station fault characteristics. This paper proposes a new directional element based on the R-L model time-domain differential equation algorithm and the difference in fault current characteristics between both ends of the AC outlet of the converter station. In the case of a short-circuit fault on the AC line out of the inverter station, there is a significant difference in the fault current characteristics supplied by the DC system side and the receiving AC system. By calculating the correlation between the measured and calculated voltage drop, the proposed directional element can accurately discern the fault direction. Analysis indicates that the proposed directional element is applicable to the line protection of the AC line out of the inverter station and can function correctly even when the converter station only has one line out. Simulation results reveal that this directional element exhibits excellent protection performance, unaffected by factors such as lightning strikes, fault types, and phase-change failures at the inverter station.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877090).

Key words: AC/DC hybrid grid; AC lines; directional element; correlation coefficient

0 引言

高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)为大规模可再生能源发电的送出和消纳提供了高效

的传输平台, 在我国远距离大容量输电和非同步联网中得到了广泛应用^[1-3]。目前, HVDC 系统的逆变站主要通过高压交流输电线路接入受端交流系统。对于与逆变站直接相连的交流线路而言, 若线路保护不能快速准确地切除线路故障, 逆变站存在闭锁的可能, 并且在受端交流系统弱馈的情况下, 受端

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877090)

系统存在崩溃的风险^[4-7]。因此, 与 HVDC 系统逆变站相连的交流线路发生故障时保护能够快速可靠动作, 对于保证电力系统的安全、稳定运行具有重大意义。

在高压交流线路保护的典型配置方案中, 距离保护具有受系统运行方式影响小、灵敏度高优点, 广泛用于线路保护^[8]。然而, 当与逆变站直接相连的高压交流线路发生故障时, 往往会导致逆变站发生换相失败^[9-14], 已有的研究表明, 换相失败和逆变器的控制策略都会使得交流侧的电压电流信号中含有较大分量的非整次谐波分量, 对传统基于工频量的距离保护造成影响, 严重时会导致距离保护误动或者拒动^[15-17]。文献[15]指出当逆变站附近交流线路发生故障时, 受直流控制系统控制策略影响, 逆变站呈现弱馈的故障特征, 会造成工频变化量距离保护动作范围大幅缩小。文献[16]表明交流侧发生故障时, 直流系统注入电流会影响测量阻抗准确性, 可能导致距离保护不正确动作或延时动作。文献[17]为了避免换相失败对距离保护的影响, 提出了利用站域信息检测换相失败的发生, 并在换相失败发生期间将距离保护闭锁的方法, 但该方法不适用于传统的就地层保护。文献[18]分析指出, 受交流系统故障时刻以及直流系统换相失败程度的影响, 现有突变量选相元件以及稳态序分量选相元件可能出现误判故障类型甚至误选相的情况。因此, 当基于工频量的传统距离保护直接应用于与逆变站直接相连的交流线路时, 会存在一系列的适应性问题。

为了解决传统距离保护存在的上述问题, 已有学者提出新的保护算法^[19-21]。文献[19]提出了基于 R-L 模型的时域微分方程保护算法, 具有不受非周期分量影响的优点。但是当故障点位于线路出口附近时, 由于测量电压趋于 0, 该算法可能无法区分正向和反向故障。文献[20]提出了一种基于二次谐波电流幅值的方法来判断出口故障时的故障方向, 但该方法受逆变器控制系统以及逆变站交流滤波器和无功补偿装置的影响较大。文献[21]在分析交直流混合电网故障耦合特性基础上, 提出基于控保协同的新型继电保护原理, 但该文献仅提出保护原理的建议与设想, 缺乏实际应用场景下保护性能的研究。

综上, 现有继电保护算法在逆变站交流出线故障时, 受逆变站故障特性影响, 存在适应性问题。改进保护算法虽然在一定程度上提高了保护适应性, 但在逆变站交流出线近区存在金属性故障时, 由于测量电压较小, 保护存在死区问题。

本文提出了一种基于电压波形相关系数的出口故障方向元件。当逆变站交流出线发生故障时, 受端交流系统提供的故障电流和直流系统提供的故障电流特性存在极大的差异。基于此, 根据保护安装处测量电压降落和基于 R-L 模型的时域微分方程计算电压降落的一致性, 可以有效地区分交流线路的正向出口故障和反向出口故障。仿真结果表明, 本文所提出的出口故障保护原理可以快速准确地判别区内外故障。该方法与时域距离保护配合能够有效改善保护性能。

1 逆变站近区交流线路出口故障特性分析

图 1 为典型高压直流逆变侧交流系统, 由直流逆变侧与受端交流系统组成, 其中 PRC 代表逆变站交流滤波器组, SVC 代表逆变站无功补偿装置。受端交流系统通常包含多条交流线路, 当逆变站交流出线发生短路故障, 流过直流逆变侧保护安装处的故障电流由背后直流逆变侧与受端交流系统其余部分共同提供; 在其他线路退出或仅有一条交流出线的情况下, 流过直流逆变侧保护安装处的故障电流全部由背后直流逆变侧提供, 由于逆变站与交流出线故障特性差异性, 须分别考虑两种情况下故障特性对保护的影响。

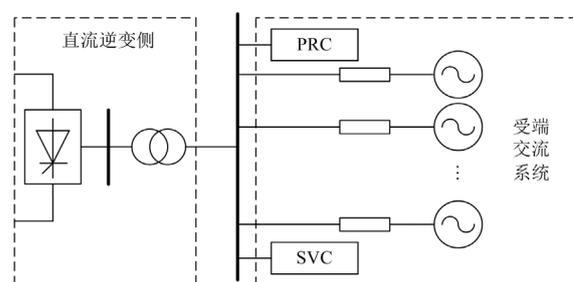


图 1 高压直流逆变侧交流系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the AC system on the HVDC inverter side

1.1 变流站多条交流出线情况

为简化分析, 以受端交流系统一条线路为研究对象, 其他受端交流系统简化为等值电源, 简化后的系统如图 2 所示, M 和 N 为直流逆变站近区交流线路 L 的两侧保护安装位置, M 侧为直流逆变侧, N 侧为交流系统侧。 $F_1 \sim F_4$ 为所选取故障点位置, 其中, F_1 位于交流线路靠近直流逆变侧的正向出口, F_2 位于线路靠近直流逆变侧的反向出口, F_3 位于线路靠近交流系统侧的正向出口, F_4 位于线路靠近交流系统侧的反向出口。规定电流的正方向为从母线流向线路。

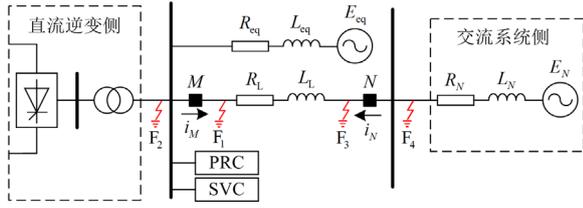


图2 变流站多条交流出线系统故障示意图

Fig. 2 Fault diagram of the inverter station connected to multiple receiving-end AC lines

1.1.1 交流线路靠近直流逆变侧出口故障

以系统发生三相对称故障为例，图2中线路保护装置 M 为研究对象，定义测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 为保护安装处 M 测量电压与线路对侧交流等值电源 E_N 的差值，表达式为

$$\Delta u_{M1}(t) = u_M(t) - e_N(t) \quad (1)$$

式中： $u_M(t)$ 是 M 处测量电压瞬时值； $e_N(t)$ 是受端交流等值电源 E_N 的电压瞬时值。由于受端交流系统以同步发电机为主，因此 $e_N(t)$ 具有较大惯性^[22]，即在故障前后的短时间内 $e_N(t)$ 的变化规律保持不变。因此， $e_N(t)$ 可以由式(2)计算得到。

$$e_N(t) = u_M(t - kT) - [R_L i_M(t - kT) + L_L \frac{di_M(t - kT)}{dt} + R_N i_M(t - kT) + L_N \frac{di_M(t - kT)}{dt}] \quad (2)$$

式中： $u_M(t - kT)$ 和 $i_M(t - kT)$ 分别是 M 处测量的记忆电压和记忆电流， T 是工频周期；考虑到系统惯性保持时间，通常 k 取1或2； R_L 和 L_L 分别是交流线路的等值电阻和等值电感； R_N 和 L_N 分别是受端交流系统的等值电阻和等值电感。

定义计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 为流过保护安装处 M 的电流在保护安装处 M 与等值电源 E_N 之间阻抗上的压降，表达式如式(3)所示。

$$\Delta u_{M2}(t) = R_L i_M(t) + L_L \frac{di_M(t)}{dt} + R_N i_M(t) + L_N \frac{di_M(t)}{dt} \quad (3)$$

式中， $i_M(t)$ 是 M 处测量电流瞬时值。

1) 反向故障

以故障位于 M 侧反向出口 F_2 处为例，此时流过 M 的故障电流 $i_M(t)$ 由受端交流等值电源提供，由故障回路可知，此时测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 相等，即

$$\Delta u_{M1}(t) = \Delta u_{M2}(t) \quad (4)$$

式(4)表明交流线路直流侧发生反向出口故障，

测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的变化趋势具有一致性。

2) 正向故障

以故障位于 M 侧正向出口 F_1 处为例，流过保护装置安装处 M 的故障电流 $i_M(t)$ 由 M 背侧的直流系统逆变侧与等值电源 E_{eq} 提供，流过线路阻抗和受端系统等值阻抗的故障电流 $i_N(t)$ 由受端交流等值电源 E_N 提供，此时测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 如式(5)所示。

$$\Delta u_{M1}(t) = -[R_L i_N(t) + L_L \frac{di_N(t)}{dt} + R_N i_N(t) + L_N \frac{di_N(t)}{dt}] \quad (5)$$

根据式(5)和式(3)可知，若要满足测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的变化趋势一致，则需要满足 $i_M(t) = -pi_N(t)$ ($p > 0$)。由于 $i_M(t)$ 主要由交流系统提供， $i_N(t)$ 由受端交流等值电源 E_N 提供，线路阻抗近似感性，由等值电源 E_{eq} 与 E_N 的相位关系，不满足 $i_M(t) = -pi_N(t)$ ，故正向出口故障的情况下测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的变化趋势不具有有一致性。

1.1.2 交流线路靠近交流系统侧出口故障

以系统发生三相对称故障为例、图2中线路保护装置 N 为研究对象，定义测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 为保护安装处 N 与交流等值电源 E_N 的电压差值，表达式如式(6)所示。

$$\Delta u_{N1}(t) = u_N(t) - e_N(t) \quad (6)$$

式中， $u_N(t)$ 是故障发生以后线路保护装置 N 处测得的电压瞬时值。由于 $e_N(t)$ 具有较大惯性， $e_N(t)$ 可用式(7)来求解。

$$e_N(t) = u_N(t - kT) + [R_N i_N(t - kT) + L_N \frac{di_N(t - kT)}{dt}] \quad (7)$$

式中， $u_N(t - kT)$ 和 $i_N(t - kT)$ 分别是 N 处测得的记忆电压和记忆电流， k 通常取1或2。

定义计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 为流过保护安装处 N 的电流在保护安装处 N 与等值电源 E_N 之间阻抗上的压降的负值，表达式如式(8)所示。

$$\Delta u_{N2}(t) = -R_N i_N(t) - L_N \frac{di_N(t)}{dt} \quad (8)$$

式中， $i_N(t)$ 为故障发生以后线路保护装置 N 处测得的电流瞬时值。

1) 反向故障

若故障位于 N 侧反向出口 F_4 处，根据故障回路，流过 N 的故障电流 $i_N(t)$ 由 M 背侧的直流系统

逆变侧与等值电源 E_{eq} 提供; 而流过交流系统等值阻抗的故障电流由交流等值电源 E_N 提供。因此在正向出口故障时测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 的变化趋势不再具有一致性。

2) 正向故障

若故障位于 N 侧正向出口 F_3 处, 此时流过 N 的故障电流 $i_N(t)$ 由交流等值电源 E_N 提供, 根据故障回路可知, 此时测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 与计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 相等, 即

$$\Delta u_{N1}(t) = \Delta u_{N2}(t) \quad (9)$$

式(9)表明在线路交流等值系统侧发生正向出口故障时测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 的变化趋势具有一致性。

1.2 逆变站一条交流出线情况

在其他交流线路退出运行或逆变站仅有一条交流出线, 线路发生短路故障时, 流入直流逆变侧保护安装处的电流全部由逆变侧提供, 将系统简化为如图3所示系统。

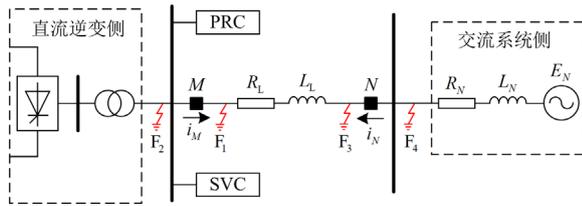


图3 逆变站交流出线故障示意图

Fig. 3 Fault diagram of the AC line at inverter side

1.2.1 交流线路靠近直流逆变侧出口故障

以系统发生三相短路故障为例、图3中线路保护装置 M 为研究对象。

1) 反向故障

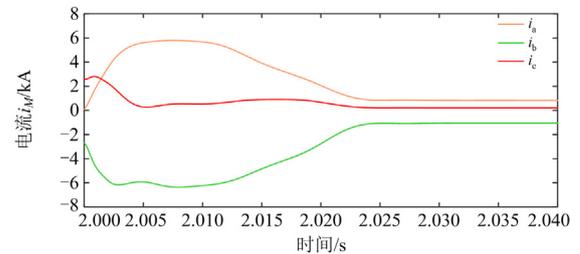
以故障位于 M 侧反向出口 F_2 处为例, 由于流过 M 的故障电流 $i_M(t)$ 仍由受端交流等值电源 E_N 提供, 测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 相等仍成立。

2) 正向故障

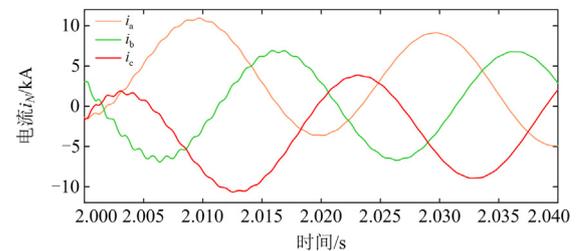
以故障位于 M 侧正向出口 F_1 处为例, 流过保护装置 M 的故障电流 $i_M(t)$ 由 M 背侧的直流系统逆变侧提供, 流过线路阻抗和受端系统等值阻抗的故障电流 $i_N(t)$ 由受端交流等值电源 E_N 提供。由于逆变站交流滤波器和无功补偿装置提供的短路电流, 线路保护装置 M 处的故障电流 $i_M(t)$ 中包含了大量低频的非整次谐波分量, 部分非整次谐波分量的幅值甚至超过基频分量幅值, 其故障暂态过程比传统

交流系统更加复杂。此外, 由于直流系统提供的故障电流中的非周期分量衰减速度相对较慢, 在交流线路靠近直流逆变侧发生正向出口故障时, 直流系统提供的故障电流 $i_M(t)$ 呈现周期量与非周期分量的叠加特征。而以同步电机为主的受端交流系统提供的故障电流 $i_N(t)$, 主要包含基频分量和衰减较快的非周期分量, 故障特征主要由基频分量决定。

图4所示为交流线路直流逆变侧正向出口 F_1 发生三相短路故障时, 直流系统提供的故障电流 $i_M(t)$ 和交流系统提供的故障电流 $i_N(t)$ 的三相电流。由图4可以看出, 在交流线路直流逆变侧发生正向出口故障的情况下, 测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的变化趋势不再具有一致性。这与交流系统直流侧发生反向出口 F_2 故障的结论相反。



(a) 直流系统提供的故障电流



(b) 交流系统提供的故障电流

图4 直流逆变侧正向出口三相短路电流

Fig. 4 Three-phase short-circuit current at the forward outlet of the DC inverter side

1.2.2 交流线路靠近交流系统侧出口故障

1) 反向故障

若故障位于 N 侧反向出口 F_4 处, 根据故障回路, 流过 N 的故障电流 $i_N(t)$ 由 M 背侧的直流系统逆变侧提供; 而流过交流系统等值阻抗的故障电流由交流等值电源 E_N 提供。在正向出口故障时测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 的变化趋势不再具有一致性。

2) 正向故障

若故障位于 N 侧正向出口 F_3 处, 此时流过 N 的故障电流 $i_N(t)$ 由交流等值电源 E_N 提供, 根据故障

回路可知,此时测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 与计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 相等。

2 出口故障方向判别

2.1 基于电压波形相关系数的方向判别

根据第1节的故障特性分析,与高压直流逆变站相连的交流线路出口处发生故障时,可以根据测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 变化趋势的一致性来区分故障方向。基于文献[22]的分析,考虑电压降落的变化趋势和极性,通过故障选相元件选取故障相,单相故障情况下选取故障相相电压、电流;其他故障情况下,选取故障相相间电压、电流。利用式(10)中的 $r_{\Delta u_1, \Delta u_2}$ 来定量地衡量故障相的测量电压降落 $\Delta u_{N1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{N2}(t)$ 的波形相关程度。

$$r_{\Delta u_1, \Delta u_2}(t) = \frac{\sum_{t=t-w}^t f[\Delta u_1(t), \Delta u_2(t)]}{\sqrt{\sum_{t=t-w}^t [\Delta u_1(t) - \overline{\Delta u_1}]^2} \sqrt{\sum_{t=t-w}^t [\Delta u_2(t) - \overline{\Delta u_2}]^2}} \quad (10)$$

式中: $\Delta u_1(t)$ 和 $\Delta u_2(t)$ 分别是测量电压降落和计算电压降落在第 t 时刻的采样值; t 是当前时刻; w 是数据窗的长度; $\overline{\Delta u_1}$ 和 $\overline{\Delta u_2}$ 分别是 $\Delta u_1(t)$ 和 $\Delta u_2(t)$ 在一个数据窗内的平均值。当 $\Delta u_1(t) \cdot \Delta u_2(t) > 0$ 时, $f[\Delta u_1(t), \Delta u_2(t)]$ 表达式为 $f[\Delta u_1(t), \Delta u_2(t)] = [\Delta u_1(t) - \overline{\Delta u_1}][\Delta u_2(t) - \overline{\Delta u_2}]$; 当 $\Delta u_1(t) \cdot \Delta u_2(t) \leq 0$ 时, $f[\Delta u_1(t), \Delta u_2(t)]$ 表达式为 $f[\Delta u_1(t), \Delta u_2(t)] = -[\Delta u_1(t) - \overline{\Delta u_1}][\Delta u_2(t) - \overline{\Delta u_2}]$ 。不难得到 $r_{\Delta u_1, \Delta u_2}$ 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当 $r_{\Delta u_1, \Delta u_2}(t) = 1$ 时, 说明 $\Delta u_1(t)$ 和 $\Delta u_2(t)$ 变化趋势完全相同; 当 $r_{\Delta u_1, \Delta u_2}(t) = -1$ 时, 说明 $\Delta u_1(t)$ 和 $\Delta u_2(t)$ 变化趋势完全相反。

通过上述测量电压降落 $\Delta u_1(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_2(t)$ 的波形变化趋势相关性, 来构造与逆变站直接相连的交流线路出口故障的方向判据, 如式(11)和式(12)所示。

$$\text{直流侧 } M: r_{\Delta u_{M1}, \Delta u_{M2}}(t) \leq r_{M.set} \quad (11)$$

$$\text{交流侧 } N: r_{\Delta u_{N1}, \Delta u_{N2}}(t) \geq r_{N.set} \quad (12)$$

式中, $r_{M.set}$ 和 $r_{N.set}$ 分别是逆变侧 M 处和交流侧 N 处电压波形相关系数的整定值。当判据式满足, 判定为系统发生正向故障。

2.2 原理实现

适用于逆变站交流出线的时域距离保护原理

已有大量研究, 文献[23]提出了基于等传变思路的超高速输电线路保护技术, 所提保护技术可以有效应对复杂多变的电力电子化电网中故障暂态特性。针对时域距离保护死区问题, 本文提出了一种适用于逆变站交流出线保护近区故障的方向元件, 该方向元件通过保护安装处低电压元件启动, 当低电压元件启动, 通过本文所提方向元件能够有效识别保护近区故障方向; 当低电压元件不启动, 仍通过时域距离保护判别故障位置。

图5为本文所提方向元件与时域距离元件保护配合逻辑图。当逆变站交流出线保护近区发生金属性故障时, 本文所提方向元件利用暂态故障信息判断故障方向, 当保护安装处电压低, 低电压元件与方向元件都满足动作条件, 保护出口; 当非近区金属性故障时, 由于低电压元件不满足动作条件, 此时通过时域距离元件判断故障位置。

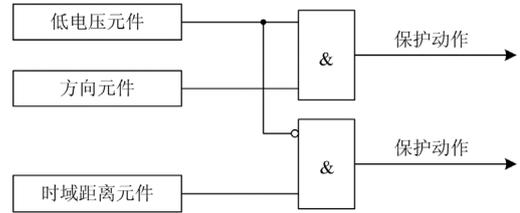


图5 保护配合逻辑图

Fig. 5 Action logic diagram of protection

图5中低电压元件动作逻辑为

$$u_{\Sigma} < k_{low} U_{nor} \quad (13)$$

式中: u_{Σ} 为 5 ms 时间窗内电压瞬时值绝对值的积分值, 单相故障情况下选取对应故障相相电压进行计算, 其他故障情况下, 选取对应故障相的相间电压; k_{low} 为低电压系数; U_{nor} 为电压额定值。

以直流侧保护为例, 流程如图6所示。图中 t_0 为保护启动时刻, t 为当前采样时刻, Δt 为采样时间间隔。利用滑动的窗口实时计算波形变化趋势相关系数。当连续 n 个点满足判据时, 判断为正方向故障。

3 仿真验证与分析

3.1 仿真模型和参数

为了对保护方案的性能进行验证, 本文采用 PSCAD/EMTDC 仿真平台建立了双极 ± 500 kV 的 HVDC 输电系统模型, 每一极分别由 12 脉波整流器和逆变器、直流输电线路以及受端交流系统组成, 系统结构如图2所示, 逆变侧逆变站装设交流滤波器组 PRC、无功补偿装置 SVC。模型的主要参数如下: 额定功率 $P_N = 2000$ MW; 逆变站交流母线额定电压为 525 kV; 有效短路比 SCR 为 $2.8 \angle 85^\circ$; 受

端交流系统等值阻抗 $Z_N = (4.25 + j35.86) \Omega$; 交流线路长度为 100 km, 单位公里线路参数见表 1。SVC 参数见表 2。

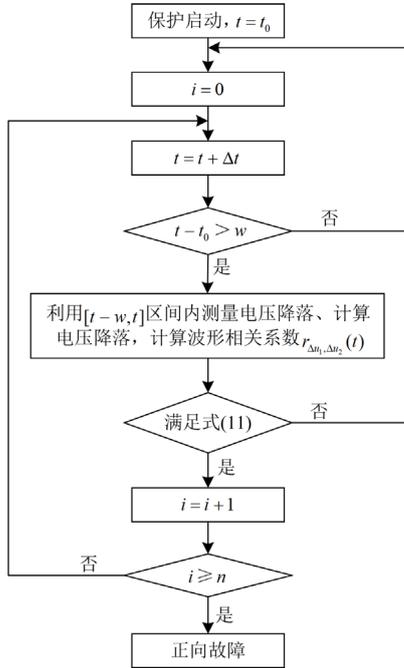


图 6 直流侧方向元件动作流程图

Fig. 6 Flow chart of directional component of the DC inverter side

表 1 单位公里线路参数

Table 1 Parameters of transmission line per kilometer

线路正序参数		线路零序参数	
参数	数值	参数	数值
电阻 r_1/Ω	0.012	电阻 r_0/Ω	0.098
电感 l_1/mH	0.853	电感 l_0/mH	2.695
电容 $c_1/\mu\text{F}$	0.013	电容 $c_0/\mu\text{F}$	0.005

表 2 SVC 参数

Table 2 Parameters of SVC

参数	数值
TSC 数量	2
TCR 数量	1
TSC 总感性无功/Mvar	600
TCR 总容性无功/Mvar	300

在本仿真实验中, 采样率为 10 kHz, 采用二阶巴特沃斯低通滤波器, 截止频率为 150 Hz。为减小数据误差带来的影响, 同时考虑到巴特沃斯滤波器引入的延迟, 本仿真中数据窗长度 w 选择为 2 ms, 当连续 10 个点满足判据时保护出口, 提高保护的可靠性。考虑测量和计算误差以及线路阻抗和受端系统等值阻抗的参数误差, 将波形相关系数门槛值设置为 $r_{M, \text{set}} = r_{N, \text{set}} = 0.3$ 。

3.2 仿真结果

3.2.1 低电压元件仿真实验结果

为验证低电压元件动作特性, 考虑故障类型、雷击等影响因素, 进行仿真分析。 k_{low} 选取为 0.1。

1) 故障类型

表 3 为不同故障类型下低电压元件仿真测试结果, 本文所采用低电压元件能够在逆变站交流出线近区发生金属性故障时可靠动作, 不受故障类型的影响。

表 3 低电压元件的测试结果

Table 3 Test results of low voltage component

故障类型	故障位置及动作时间	
	F ₁ 、F ₂	F ₃ 、F ₄
AG	5.0 ms	5.0 ms
ABG	5.0 ms	5.0 ms
AB	5.0 ms	5.0 ms
ABC	5.0 ms	5.0 ms

2) 雷击

文中采取标准的雷电流双指数波模型^[24], 其函数表达式见式(14)。

$$I = AI_m(e^{\alpha t} - e^{\beta t}) \quad (14)$$

式中: I 为雷电流瞬时值; I_m 为雷电流的幅值, 选取雷电流波形为 2.6/50 μs 双指数波, 式(14)中 $A=1.1157$, $\alpha=-15900$, $\beta=-712000$, 幅值选取为 30 kA。

表 4 为雷击情况下低电压元件动作情况, 仿真结果表明雷击不会引起低电压元件动作。

表 4 雷击情况下低电压元件的测试结果

Table 4 Test results of low voltage component under lightning strike condition

故障位置	出线数量及动作时间	
	一条出线	多条出线
F ₁	NO	NO
F ₂	NO	NO
F ₃	NO	NO
F ₄	NO	NO

注: NO 表示不动作, 下同。

3.2.2 多条交流出线情况下仿真实验结果

在图 2 所示系统, 故障点设置为图中 F₁—F₄ 处, 故障时刻为 2 s。记多条交流出线情况下交流线路靠近直流逆变侧出口发生故障为“条件 A”, 交流线路靠近交流系统侧出口故障为“条件 B”。

1) 交流线路靠近直流逆变侧出口故障

当直流逆变侧正向出口 F₁ 发生故障, 测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的相关系数如

图 7 所示。从图 7 可看出，交流线路靠近直流侧正向出口发生短路故障时，由相关系数变化规律，测量电压降落和计算电压降落的变化趋势明显不同，方向元件在故障发生后能够正确判断故障方向。

同样设置直流逆变侧反向出口 F_2 发生故障，仿真结果如图 8 所示。交流线路靠近直流逆变侧出口故障测试结果如表 5 所示，由表 5 可知，方向元件能够正确判断故障方向，不受故障类型影响，且具有良好的动作性能。

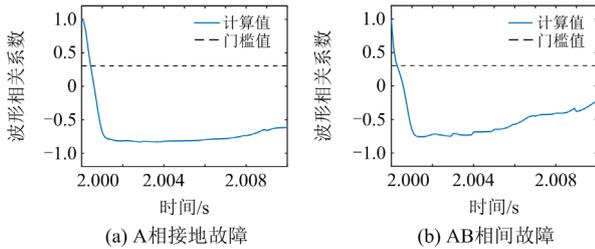


图 7 直流逆变侧正向出口故障的仿真结果

Fig. 7 Simulation result at the forward outlet of the DC inverter side

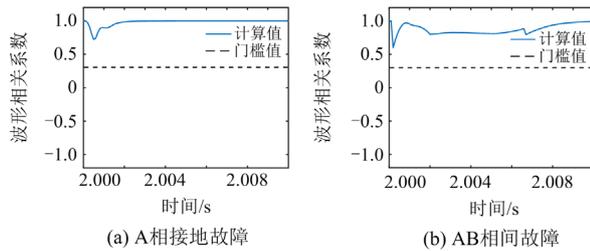


图 8 直流逆变侧反向出口故障的仿真结果

Fig. 8 Simulation result at the backward outlet of the DC inverter side

表 5 短路故障方向元件的测试结果(条件 A)

Table 5 Test results of fault directional component at short circuit fault (condition A)

故障类型	故障位置及动作时间	
	F_1	F_2
AG	5.0 ms	NO
ABG	5.0 ms	NO
AB	5.0 ms	NO
ABC	5.0 ms	NO

设置交流线路靠近直流逆变侧正向出口 F_2 、反向出口 F_1 发生雷击故障，方向元件测试结果如表 6 所示，方向元件能够正确判断故障方向。由于该故障工况下，低电压元件不满足动作条件，故保护不动作。

2) 交流线路靠近交流系统侧出口故障

设置交流线路靠近交流系统侧正向出口 F_3 、反

向出口 F_4 发生故障，仿真测试结果如表 7 所示。以单相接地故障与两相相间故障为例，测量电压降落 $\Delta u_{M1}(t)$ 和计算电压降落 $\Delta u_{M2}(t)$ 的相关系数如图 9 和图 10 所示。逆变站存在多条交流出线，交流线路靠近交流系统侧出口发生故障时，方向元件能够正确判断故障方向，不受故障类型影响，满足保护速动性要求。

表 6 多条交流出线情况下发生雷击方向电压元件的测试结果

Table 6 Test results of directional voltage component in the event of lightning strikes with multiple AC outgoing lines

故障位置	动作时间
F_1	5.0 ms
F_2	NO

表 7 短路故障方向元件的测试结果(条件 B)

Table 7 Test results of fault directional component at short circuit fault (condition B)

故障类型	故障位置及动作时间	
	F_3	F_4
AG	5.0 ms	NO
ABG	5.0 ms	NO
AB	5.0 ms	NO
ABC	5.0 ms	NO

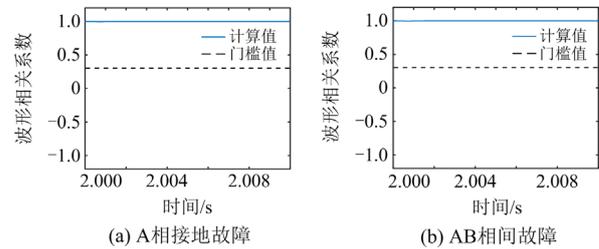


图 9 交流系统侧正向出口故障的仿真结果

Fig. 9 Simulation result at the forward outlet of the AC system side

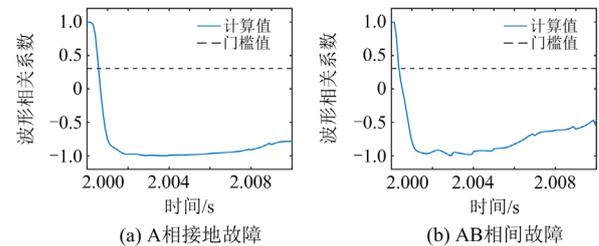


图 10 交流系统侧反向出口故障的仿真结果

Fig. 10 Simulation result at the backward outlet of the AC system side

设置交流线路靠近交流系统侧正向出口 F_3 、反向出口 F_4 发生雷击故障，动作结果如表 8 所示。交

流线路靠近交流系统侧出口发生雷击故障情况下, 本文所提方向元件动作, 能够正确判断故障方向, 但由于低电压元件不满足动作条件, 保护不动作。

表 8 雷击故障下方向电压元件的测试结果

Table 8 Test results of fault directional component under lightning stroke fault

故障位置	动作时间
F ₃	5.0 ms
F ₄	NO

3.2.3 单条交流出线情况下仿真实验结果

为进一步验证所提保护适用性, 如图 3 所示系统逆变电站仅有一条交流出线, 分别在 F₁—F₄ 处设置多种类型的故障, 故障时刻为 2 s。记单条交流出线情况下交流线路靠近直流逆变侧出口发生故障为“条件 C”, 交流线路靠近交流系统侧出口故障为“条件 D”。

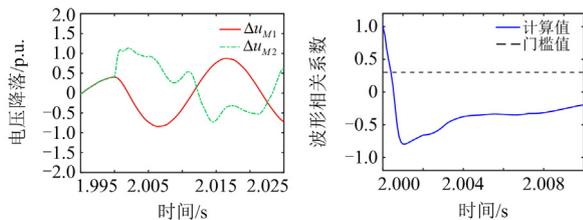
1) 交流线路靠近直流逆变侧出口故障

设置交流线路靠近直流逆变侧正向出口 F₂、反向出口 F₁ 发生故障, 仿真测试结果如表 9 所示, 电压降落及波形相关系数如图 11 和图 12 所示。

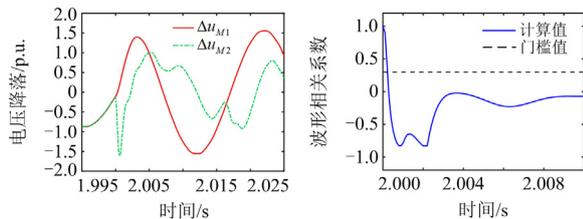
表 9 短路故障方向元件的测试结果(条件 C)

Table 9 Test results of fault directional components at short circuit fault (condition C)

故障类型	故障位置及动作时间	
	F ₁	F ₂
AG	5.0 ms	NO
ABG	5.0 ms	NO
AB	5.0 ms	NO
ABC	5.0 ms	NO



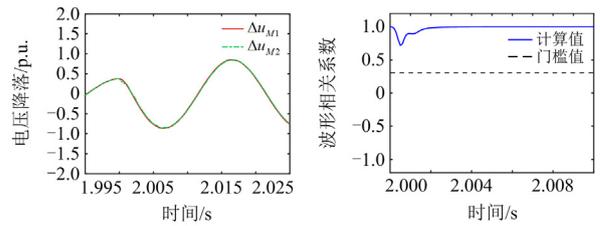
(a) A相接地故障电压降落及波形相关系数



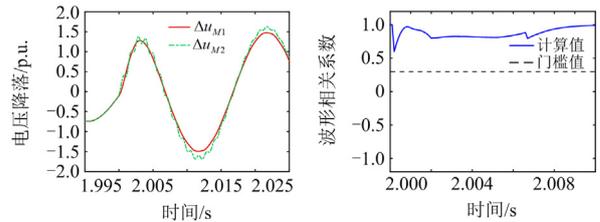
(b) AB两相短路故障电压降落及波形相关系数

图 11 直流逆变侧正向出口故障的仿真结果

Fig. 11 Simulation result at the forward outlet of the DC inverter side



(a) A相接地故障电压降落及波形相关系数



(b) AB两相短路故障电压降落及波形相关系数

图 12 直流逆变侧反向出口故障的仿真结果

Fig. 12 Simulation result at the backward outlet of the DC inverter side

设置交流线路靠近直流逆变侧正向出口 F₂、反向出口 F₁ 发生雷击故障, 方向元件测试结果与表 6 相同, 本文所提方向元件动作能够正确判断故障方向, 但由于低电压元件不满足动作条件, 保护不动作。

2) 交流线路靠近交流系统侧出口故障

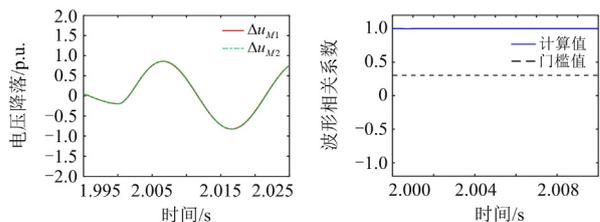
设置交流线路靠近交流系统侧正向出口 F₃、反向出口 F₄ 发生故障, 仿真测试结果如表 10 所示, 电压降落及波形相关系数如图 13 和图 14 所示。

设置交流线路靠近交流系统侧正向出口 F₃、反向出口 F₄ 发生雷击故障, 方向元件测试结果与表 8 相同, 本文所提方向元件能够正确判断故障方向, 但

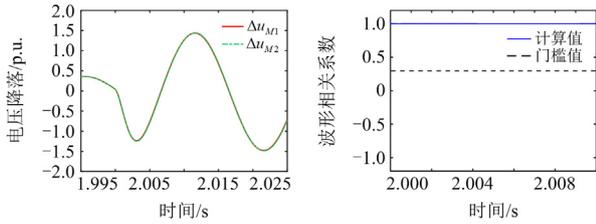
表 10 短路故障方向元件的测试结果(条件 D)

Table 10 Test results of fault directional component at short circuit fault (condition D)

故障类型	故障位置及动作时间	
	F ₃	F ₄
AG	5.0 ms	NO
ABG	5.0 ms	NO
AB	5.0 ms	NO
ABC	5.0 ms	NO



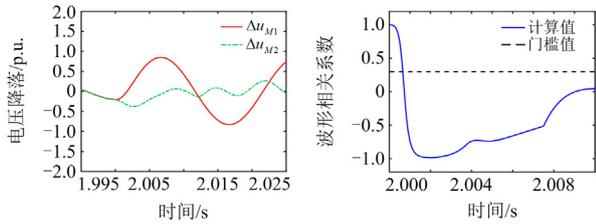
(a) A相接地故障电压降落及波形相关系数



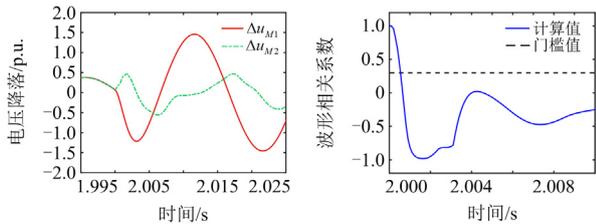
(b) AB两相短路故障电压降落及波形相关系数

图 13 交流系统侧正向出口故障的仿真结果

Fig. 13 Simulation result at the forward outlet of the AC system side



(a) A相接地故障电压降落及波形相关系数



(b) AB相间故障电压降落及波形相关系数

图 14 交流系统侧反向出口故障的仿真结果

Fig. 14 Simulation result at the backward outlet of the AC system side

由于低电压元件不满足动作条件，保护不动作。

当逆变器仅存在一条交流出线，逆变器保护受逆变器故障特性影响较大。该情况下，当线路发生区内故障，由图 11 与图 14 可以看出，由于逆变器交流出线两端故障特性差异性，两种电压降落存在较大差异；当发生区外故障时，由图 12 与图 13 可以看出，两种电压降落波形相似度较高。

由仿真结果可知，本文所提出的方向元件能够在逆变器仅有单条交流出线情况下可靠动作，且不受故障类型的影响。

3.2.4 换相失败对方向元件动作结果的影响

在逆变器近区发生严重短路故障时，若直流控制系统响应不当则可能引发逆变器换相失败^[25]。表 11 为不同短路故障情况下逆变器换相失败发生情况。以直流逆变器正向出口 F₁ 发生三相金属性短路故障为例，逆变器阀侧电压如图 15 所示。

表 11 短路故障下逆变器换相失败情况

Table 11 Test results of commutation failure at short circuit fault

出线数量	故障类型	故障位置及是否发生换相失败			
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
一条	AG	YES	YES	YES	YES
	ABG	YES	YES	YES	YES
	ABC	YES	YES	YES	YES
多条	AG	YES	YES	YES	YES
	ABG	YES	YES	YES	YES
	ABC	YES	YES	YES	YES

注：YES 表示发生了换相失败。

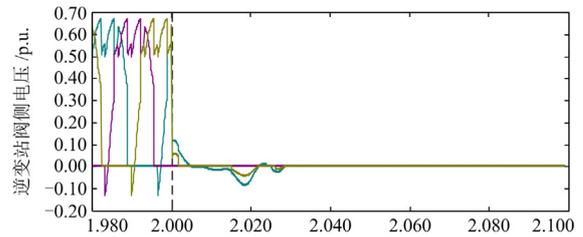


图 15 换相失败情况下逆变器阀侧电压

Fig. 15 Converter valve side voltage under conversion failure

由表 11 结果可知，逆变器交流出线保护近区发生金属性短路情况下，将会引发逆变器换相失败。由表 7—表 10 方向元件动作结果可知，本文所提方向元件在逆变器发生换相失败情况下能够可靠动作。

由上述仿真结果可知，本文所提出的方向元件能够在逆变器交流出线保护近区发生金属性故障情况下可靠动作，且不受雷击、故障类型、逆变器换相失败等因素的影响。

4 结论

交直流混联电网中，逆变器等设备故障特性相较于传统同步机电源更加复杂，传统基于工频分量的继电保护存在适应性问题。利用逆变器交流出线两端故障特性差异性，提出一种基于电压波形相关系数的保护出口故障方向元件：当逆变器直流侧发生短路故障，直流系统侧提供的故障电流和受端交流系统提供的故障电流特性差异极大，通过计算测量电压降落和计算电压降落的变化趋势的相关系数可正确判断故障方向；当交流线路交流侧发生出口故障时，结论与直流侧相反。仿真分析表明，所提方向元件能够正确判断直流逆变器送出线保护近区故障方向，同时适用于直流逆变器有多条送出线和仅剩一条送出线的工况。

参考文献

- [1] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [2] 王璐, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 17-23.
WANG Lu, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Analysis of asymmetric fault commutation failure in an HVDC system with DC current variation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 17-23.
- [3] 张海强, 林圣, 刘磊, 等. 基于直流差动保护动作的送端换流器接地故障定位方案[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2382-2390.
ZHANG Haiqiang, LIN Sheng, LIU Lei, et al. Grounding fault location scheme of HVDC rectifier based on the action of DC differential protection[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2382-2390.
- [4] JAVAD K, PETER I, ARASH A, et al. Review of HVDC control in weak AC grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 162: 194-206.
- [5] 林一峰, 王增平, 王彤, 等. 构建更加坚强电网安全“第一道防线”的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 170-178.
LIN Yifeng, WANG Zengping, WANG Tong, et al. Discussion on building a stronger first line of defense for grid security[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 170-178.
- [6] HO-IK S, HAK-MAN K. An algorithm for effective mitigation of commutation failure in high-voltage direct-current systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 3(4): 1437-1446.
- [7] YANG H H, CAI Z X, LI X H, et al. Assessment of commutation failure in HVDC systems considering spatial-temporal discreteness of AC system faults[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 1055-1065.
- [8] 秦瑜, 文明浩, 白宇, 等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3888-3896.
QIN Yu, WEN Minghao, BAI Yu, et al. A novel distance protection scheme for HVDC transmission lines based on criterion extremum online estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3888-3896.
- [9] 许朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.
XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 140-146.
- [10] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [11] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 499-513.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513.
- [12] 周保荣, 洪潮, 饶宏, 等. 广东多直流输电换相失败对电网稳定运行的影响[J]. 南方电网技术, 2017, 11(3): 18-23.
ZHOU Baorong, HONG Chao, RAO Hong, et al. Influence of simultaneous commutation failure of Guangdong multiple HVDC on power system secure operation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 18-23.
- [13] 洪潮. 馈入弱交流系统的直流输电换相失败恢复特性对输电能力的影响分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(3): 6-12, 24.
HONG Chao. Analysis on the influence of commutation failure fault recovery characteristics of HVDC connected to weak AC system on transmission capability[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 6-12, 24.
- [14] 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 139-143.
ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 139-143.
- [15] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 98-102.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Performance analysis of distance protection based on industrial frequency variation applied to AC-DC hybrid power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-102.
- [16] 费彬, 黄少锋, 申洪明. 交直流互联系统对距离保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 15-21.

- FEI Bin, HUANG Shaofeng, SHEN Hongming. Impact of AC-DC interconnected system on distance protection and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 15-21.
- [17] 王增超, 郑俊超, 曾耿晖, 等. 基于高压直流换流站站域信息的交流线路距离保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 101-107.
- WANG Zengchao, ZHENG Junchao, ZENG Genghui, et al. A distance protection method for AC transmission lines based on substation area information in HVDC convertor station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 101-107.
- [18] 李永丽, 杨子荷, 宋金钊, 等. HVDC 馈入及其换相失败对交流电网选相元件的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1825-1834.
- LI Yongli, YANG Zihé, SONG Jinzhao, et al. Influence analysis of HVDC and commutation failure on AC phase selector[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1825-1834.
- [19] 罗瑞, 樊艳芳, 刘群杰. 基于时域的交直流混联系统抗过渡电阻的单相接地距离保护研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 123-129.
- LUO Rui, FAN Yanfang, LIU Qunjie. Research on anti-transition resistance single-phase ground distance protection of AC-DC hybrid power system based on time-domain[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 123-129.
- [20] HUANG S, SHEN H, FEI B, et al. Effect of commutation failure on the distance protection and the countermeasures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(9): 838-844.
- [21] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 176-187.
- HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [22] SONG G B, WANG C Q, WANG T, et al. A phase selection method for wind power integration system using phase voltage waveform correlation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 740-748.
- [23] 戚宣威, 李宝伟, 董新涛, 等. 基于等传变思路的超高速输电线路保护研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 178-187.
- QI Xuanwei, LI Baowei, DONG Xintao, et al. Research and development on the ultra-high-speed transmission line protection based on the concept of the equal transfer[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 178-187.
- [24] 王钢, 李海锋, 赵建仓, 等. 基于小波多尺度分析的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 143-148.
- WANG Gang, LI Haifeng, ZHAO Jiancang, et al. Identification of transients on transmission lines caused by direct lightning strokes based on multiresolution signal decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 143-148.
- [25] 陈晓龙, 齐晓情, 李永丽, 等. 整流侧交流系统故障引发逆变器换相失败的原因分析及抑制方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 793-805.
- CHEN Xiaolong, QI Xiaoqing, LI Yongli, et al. Research on cause analysis and suppression methods of inverter commutation failure caused by the AC system fault at rectifier side[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 793-805.

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2023-04-28

作者简介:

肖繁(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为继电保护。E-mail: 664297673@qq.com

(编辑 周金梅)