

DOI: 10.7667/PSPC201826

方向纵联保护对 LCC-HVDC 逆变侧交流线路的适应性分析

王 栋, 高厚磊, 李文琳, 刘 震

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要: 基于电压、电流故障分量的方向纵联保护原理广泛应用于交流线路的主保护。由于 LCC-HVDC 逆变侧交流线路具有不同于纯交流系统的故障特性, 方向纵联保护能否继续适用需加以分析。首先, 分析了逆变站三种不同的工作状态(未发生换相失败、发生单次换相失败、发生连续换相失败)对方向纵联保护的影响。其次, 分析了逆变侧三种典型的交流出线结构(单回线单输电走廊、单回线多输电走廊、多回线输电走廊)对方向纵联保护的影响。最后, 基于±800 kV 天中直流系统(包括逆变侧 500 kV 交流出线)PSCAD 仿真模型, 验证了研究结论的正确性。

关键词: 方向纵联保护; LCC-HVDC; 逆变侧交流线路; 适应性

Adaptability analysis of directional pilot protection for AC transmission lines connected to LCC-HVDC inverter station

WANG Dong, GAO Houlei, LI Wenlin, LIU Zhen

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Directional pilot protection principle, which is based on voltage and current fault components, is used in AC transmission lines widely. However, comparing to general AC transmission lines, the AC transmission lines which is connected to LCC-HVDC inverter station have different fault characteristic and the adaptability of directional pilot protection should be analyzed. Firstly, the effect of three different working status of inverter station (no commutation failure, single commutation failure or continuous commutation failure) on directional pilot protection is analyzed. Secondly, the effect of three different AC transmission line structures connected to inverter station (single transmission line, several single transmission lines or double transmission lines) on directional pilot protection is also analyzed. Eventually, ±800 kV Tian-Zhong LCC-HVDC transmission system (including 500 kV AC transmission system connected to inverter station) simulation model is established based on PSCAD and the simulation results prove the correctness of theoretical analysis.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900603).

Key words: directional pilot protection; LCC-HVDC; AC transmission line connected to inverter station; adaptability

0 引言

相对于传统交流输电系统, 高压直流输电系统具有以下主要优势: 输电距离长、输电效率高、输电容量大^[1-6]。但由于电流源型高压直流输电(Line Commutated Converter based HVDC, LCC-HVDC)逆变站的特殊结构和控制策略, 其正常运行易受到逆变侧交流线路故障的影响, 如故障不能迅速切除,

易导致换相失败问题, 甚至会导致直流闭锁。因此, 分析方向纵联保护原理对逆变侧交流线路的适应性, 对保证 LCC-HVDC 系统的正常运行具有重要的意义^[7-12]。

国内外对方向纵联保护原理在 LCC-HVDC 逆变侧交流线路的适应性分析仍不足。文献[13-14]建立了单次换相失败和连续换相失败状态下逆变站等效模型, 由于该模型未考虑无换相失败的工况, 因此需进一步完善。文献[15-16]简单分析了方向纵联保护原理对逆变侧交流线路的适应性, 然而未考虑

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900603)

到逆变侧不同交流出线结构对保护的影响。

首先,以文献[13-16]的研究为基础,本文完善了正常工作状态(下文简称工况 0)、故障后无换相失败工作状态(下文简称工况 1)、故障后发生单次换相失败工作状态(下文简称工况 2)、故障后发生连续换相失败工作状态(下文简称工况 3)四种工况下的逆变站等效模型;其次,本文研究了单回线单输电走廊(下文简称结构 1)、单回线多输电走廊(下文简称结构 2)、多回线输电走廊(下文简称结构 3)三种典型交流出线结构对保护的影响;最后,为验证本文的理论分析,基于±800 kV 天中高压直流输电系统实际参数建立了 PSCAD/EMTDC 仿真模型,并涵盖了三种典型交流出线结构。

1 逆变站等效模型

为研究方向纵联保护对 LCC-HVDC 逆变侧交流线路的适应性,需完善逆变站等效模型。图 1 为典型的交直流混联系统结构图,其中, Z_C 为交流母线大容量无功补偿装置的等值阻抗, i_D 为换流阀输出的电流, i_C 为无功补偿装置输出的电流, \dot{U}_{Equ} 为逆变站交流母线电压, i_{Equ} 为逆变站交流母线输出电流。

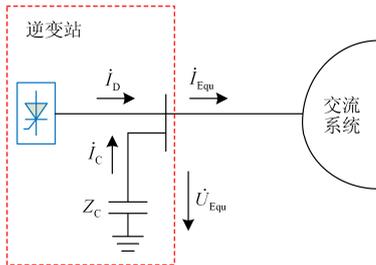


图 1 交直流混联电网典型结构

Fig. 1 Typical structure of AC-DC hybrid power system

图 2 为典型的交直流混联系统等效模型。考虑到逆变站工作状态与交流母线电压直接相关,因此将逆变站换流阀等效为一个压控电流源。

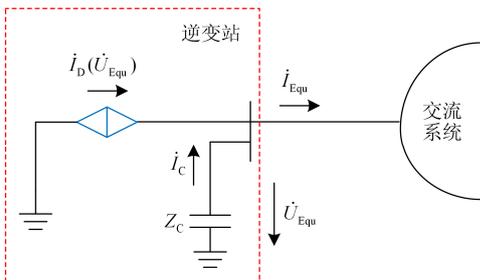


图 2 交直流混联电网等效模型

Fig. 2 Equivalent model of AC-DC hybrid power system

下文研究不同工况下逆变站电压、电流的关系,

如图 3 所示。

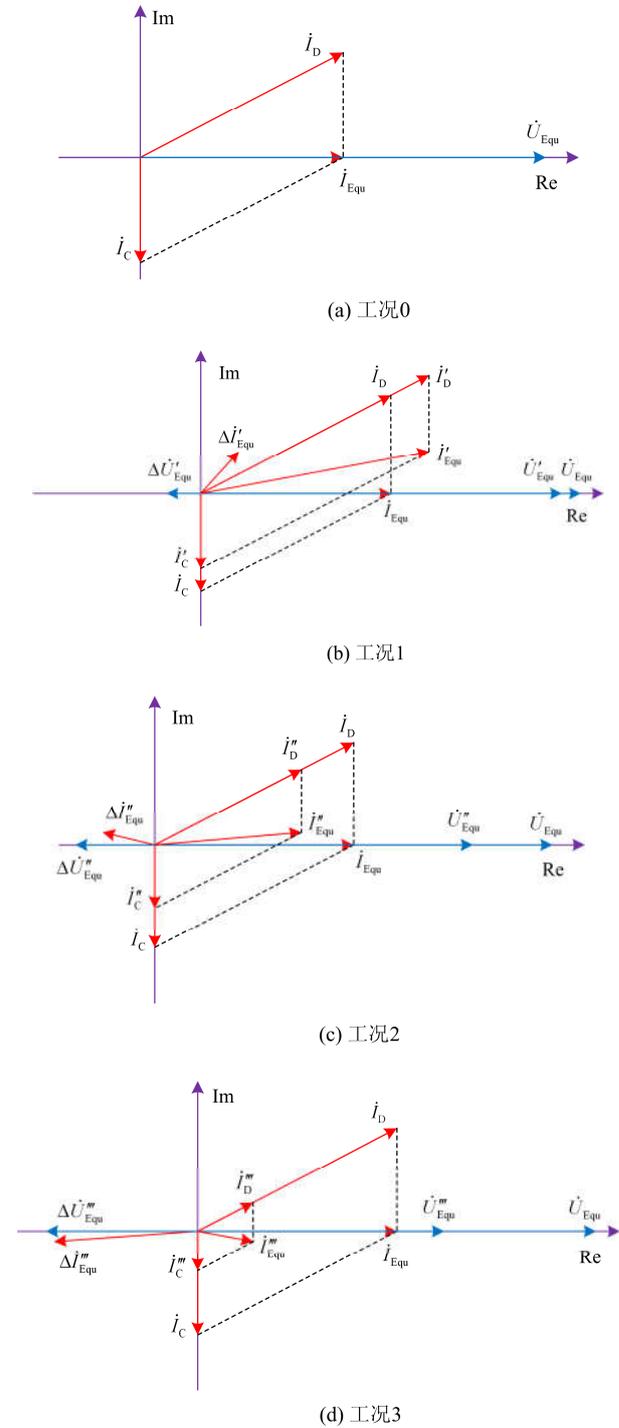


图 3 各工况下电压、电流相位关系

Fig. 3 Relationship between voltages and currents under different status

工况 0: 如图 3(a)所示,由于逆变站采取全补偿策略,逆变侧输出电压 \dot{U}_{Equ} 和电流 i_{Equ} 为同相位。因 \dot{U}_{Equ} 领先 i_C 90° , 而逆变站消耗的无功功率约为

直流线路传输有功功率的 50%~60%, i_D 领先 i_{Equ} 约 30° 左右。

工况 1: 如图 3(b)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{Equ} 略微下降为 \dot{U}'_{Equ} , 无功补偿装置输出电流下降为 i'_C 。相对于 i_D , 换流阀输出电流 i'_D 增大或保持不变。因此, 逆变站输出电流变为 i'_{Equ} 。最终, 可得到电压和电流变化量分别为 $\Delta\dot{U}'_{Equ}$ 和 $\Delta i'_{Equ}$ 。

工况 2: 如图 3(c)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{Equ} 进一步下降为 \dot{U}''_{Equ} , 无功补偿装置输出电流进一步下降为 i''_C 。相对于 i_D , 换流阀输出电流 i''_D 幅值减小、相位不变。因此, 逆变站输出电流变为 i''_{Equ} 。最终, 可得到电压和电流变化量分别为 $\Delta\dot{U}''_{Equ}$ 和 $\Delta i''_{Equ}$ 。

工况 3: 如图 3(d)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{Equ} 严重下降为 \dot{U}'''_{Equ} , 从而无功补偿装置输出电流下降为 i'''_C 。相对于 i_D , 换流阀输出电流 i'''_D 幅值进一步减小、相位不变。因此, 逆变站输出电流变为 i'''_{Equ} 。最终, 可得到电压和电流变化量分别为 $\Delta\dot{U}'''_{Equ}$ 和 $\Delta i'''_{Equ}$ 。

2 方向纵联保护适应性理论分析

2.1 方向纵联保护原理

基于故障分量的故障方向判别原理为^[17]

$$\begin{cases} -90^\circ < \theta = \arg\left(\frac{\Delta\dot{U}}{Z_r\Delta\dot{i}}\right) < 90^\circ, & \text{反向故障} \\ 90^\circ < \theta = \arg\left(\frac{\Delta\dot{U}}{Z_r\Delta\dot{i}}\right) < 270^\circ, & \text{正向故障} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为故障方向判别角; $\Delta\dot{U}$ 为电压故障分量; $\Delta\dot{i}$ 为电流故障分量; Z_r 为附加阻抗(阻抗角取 90°)。

当线路两端方向元件均判别为正向故障时, 可识别出区内故障。通常, 远离逆变站的保护单元不会受逆变站工作状态的影响, 本文的研究重点将是近逆变侧保护单元。同时, 尽管多回输电线路结构下存在功率倒向现象, 继而引起区外故障保护误动问题。但保护误动可以通过闭锁保护装置一段时间(如 40 ms)避免, 因此本文主要研究区内故障的保护性能。

2.2 结构 1 对方向纵联保护原理的影响

结构 1 如图 2 所示, 逆变站仅有一个单回线出

线。根据第 1 节的分析, 有式(2)。

$$\begin{cases} \text{工况1: } 0^\circ < \theta'_L = \arg\left(\frac{\Delta\dot{U}'_{Equ}}{Z_r\Delta i'_{Equ}}\right) < 90^\circ \\ \text{工况2: } -90^\circ < \theta''_L = \arg\left(\frac{\Delta\dot{U}''_{Equ}}{Z_r\Delta i''_{Equ}}\right) < 0^\circ \\ \text{工况3: } 180^\circ < \theta'''_L = \arg\left(\frac{\Delta\dot{U}'''_{Equ}}{Z_r\Delta i'''_{Equ}}\right) < 270^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ'_L 、 θ''_L 、 θ'''_L 分别为三种工况下近逆变侧保护单元故障方向判别角; $\Delta\dot{U}'_{Equ}$ 、 $\Delta\dot{U}''_{Equ}$ 、 $\Delta\dot{U}'''_{Equ}$ 分别为三种工况下电压故障分量; $\Delta i'_{Equ}$ 、 $\Delta i''_{Equ}$ 、 $\Delta i'''_{Equ}$ 分别为三种工况下电流故障分量; Z_r 为附加阻抗。

因此, 近逆变侧保护单元仅在工况 3 下能正确识别正向故障, 即方向纵联保护原理不适应逆变站结构 1 出线。

2.3 结构 2 对方向纵联保护原理的影响

图 4 为结构 2 及其故障附加状态。

图 4(a)为结构 2 的结构图, 逆变站有多条单回线出线。其中, Z_C 为交流母线大容量无功补偿装置的等值阻抗, i_D 为换流阀输出的等效电流, i_C 为无功补偿装置输出的等效电流, \dot{U}_{L1} 为逆变站交流母

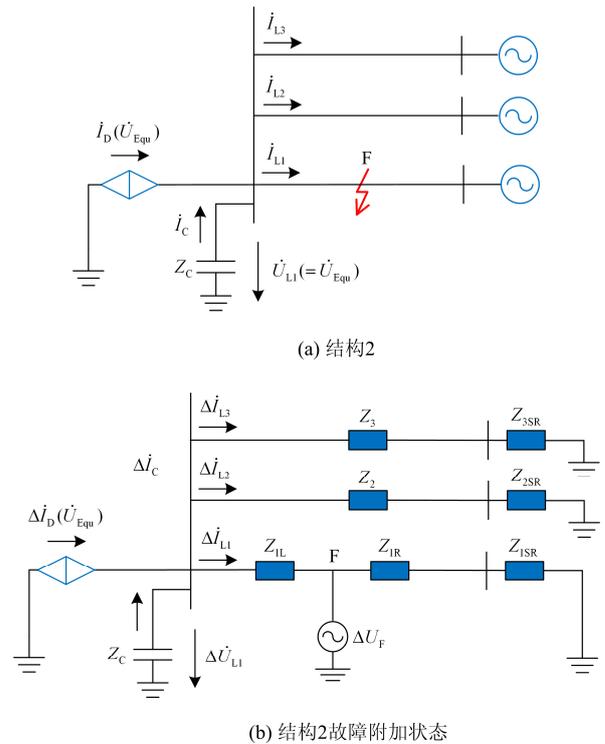


图 4 结构 2 及其故障附加状态

Fig. 4 Structure 2 and its fault additional status

线电压, i_{L1} 、 i_{L2} 、 i_{L3} 分别为逆变站交流母线输出电流。图 4(b)为结构 2 故障附加状态。其中 Δi_C 、 Δi_D 、 Δi_{L1} 、 Δi_{L2} 、 Δi_{L3} 、 $\Delta \dot{U}_{L1}$ 均为故障分量, Z_{1L} 、 Z_{1R} 、 Z_2 、 Z_3 均为线路阻抗, Z_{1SR} 、 Z_{2SR} 、 Z_{3SR} 均为系统阻抗。

基于图 5, 研究不同工况下故障线路等效电压电流关系。

工况 0: 如图 5(a)所示, 由于逆变站采取全补偿策略, 逆变侧等效输出电压 \dot{U}_{L1} 和电流 $i_{L1} + i_{L2} + i_{L3}$ 为同相位。

工况 1: 如图 5(b)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{L1} 略微下降为 \dot{U}'_{L1} 。根据图 3 的分析, 逆变站等效输出电流变为 $i'_{L1} + i'_{L2} + i'_{L3}$ 。因此, 得到逆变站输出电压电流变化量为 $\Delta \dot{U}'_{L1}$ 和 $\Delta i'_{L1} + \Delta i'_{L2} + \Delta i'_{L3}$ 。考虑到:

$$\begin{cases} \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{L1}}{\Delta i'_{L2}} = \arg(Z_2 + Z_{2SR}) \approx 90^\circ \\ \arg \frac{\Delta \dot{U}'_{L1}}{\Delta i'_{L3}} = \arg(Z_3 + Z_{3SR}) \approx 90^\circ \end{cases} \quad (3)$$

因此, $\Delta \dot{U}'_{L1}$ 领先 $\Delta i'_{L2} + \Delta i'_{L3}$ 大约 90° 。从而, 可得到故障线路近逆变站侧电流故障分量为 $\Delta i'_{L1}$ 。

工况 2: 如图 5(c)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{L1} 进一步下降为 \dot{U}''_{L1} 。根据图 3 的分析, 逆变站等效输出电流变为 $i''_{L1} + i''_{L2} + i''_{L3}$ 。因此, 得到逆变站输出电压电流变化量为 $\Delta \dot{U}''_{L1}$ 和 $\Delta i''_{L1} + \Delta i''_{L2} + \Delta i''_{L3}$ 。考虑到:

$$\begin{cases} \arg \frac{\Delta \dot{U}''_{L1}}{\Delta i''_{L2}} = \arg(Z_2 + Z_{2SR}) \approx 90^\circ \\ \arg \frac{\Delta \dot{U}''_{L1}}{\Delta i''_{L3}} = \arg(Z_3 + Z_{3SR}) \approx 90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

因此, $\Delta \dot{U}''_{L1}$ 领先 $\Delta i''_{L2} + \Delta i''_{L3}$ 大约 90° 。从而, 可得到故障线路近逆变站侧电流故障分量为 $\Delta i''_{L1}$ 。

工况 3: 如图 5(d)所示, 故障后逆变站交流母线电压 \dot{U}_{L1} 进一步下降为 \dot{U}'''_{L1} 。根据图 3 的分析, 逆变站等效输出电流变为 $i'''_{L1} + i'''_{L2} + i'''_{L3}$ 。因此, 得到逆变站输出电压电流变化量为 $\Delta \dot{U}'''_{L1}$ 和 $\Delta i'''_{L1} + \Delta i'''_{L2} + \Delta i'''_{L3}$ 。考虑到:

$$\begin{cases} \arg \frac{\Delta \dot{U}'''_{L1}}{\Delta i'''_{L2}} = \arg(Z_2 + Z_{2SR}) \approx 90^\circ \\ \arg \frac{\Delta \dot{U}'''_{L1}}{\Delta i'''_{L3}} = \arg(Z_3 + Z_{3SR}) \approx 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

因此, $\Delta \dot{U}'''_{L1}$ 领先 $\Delta i'''_{L2} + \Delta i'''_{L3}$ 大约 90° 。从而, 可得到故障线路近逆变站侧电流故障分量为 $\Delta i'''_{L1}$ 。

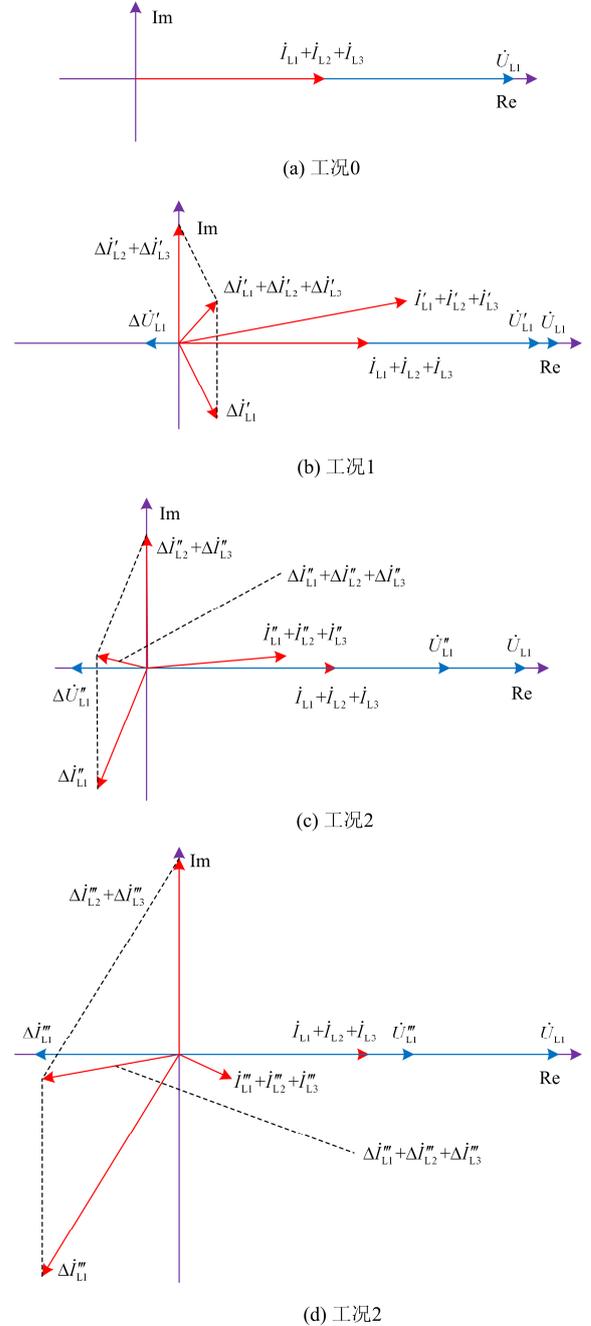


图 5 各工况下电压、电流相位关系(结构 2)
Fig. 5 Relationship between voltages and currents under different status (structure 2)

基于上述分析, 得到:

$$\begin{cases} \text{工况1: } \theta'_{L1} = \arg\left(\frac{\Delta \dot{U}'_{L1}}{Z_r \Delta \dot{I}'_{L1}}\right) \approx 180^\circ \\ \text{工况2: } \theta''_{L1} = \arg\left(\frac{\Delta \dot{U}''_{L1}}{Z_r \Delta \dot{I}''_{L1}}\right) \approx 180^\circ \\ \text{工况3: } \theta'''_{L1} = \arg\left(\frac{\Delta \dot{U}'''_{L1}}{Z_r \Delta \dot{I}'''_{L1}}\right) \approx 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

因此, 方向纵联保护可适应逆变侧结构 2 出线结构。

2.4 结构 3 对方向纵联保护原理的影响

结构 3 如图 6(a)所示, 逆变站为双回线出线。其中, Z_C 为交流母线大容量无功补偿装置的等值阻抗, I_D 为换流阀输出的电流, I_C 为无功补偿装置输出的电流, \dot{U}_{L1} 为逆变站交流母线电压, I_{L1} 为故障线路电流。图 6(b)为结构 3 故障附加状态。其中 ΔI_C 、 ΔI_D 、 ΔI_{L1} 、 ΔU_{L1} 均为故障分量, Z_{L1} 、 Z_{1R} 、 Z_2 均为线路阻抗, Z_{SR} 为系统阻抗。对红色区域做 Y- Δ 变换, 即可得到图 6(c)。

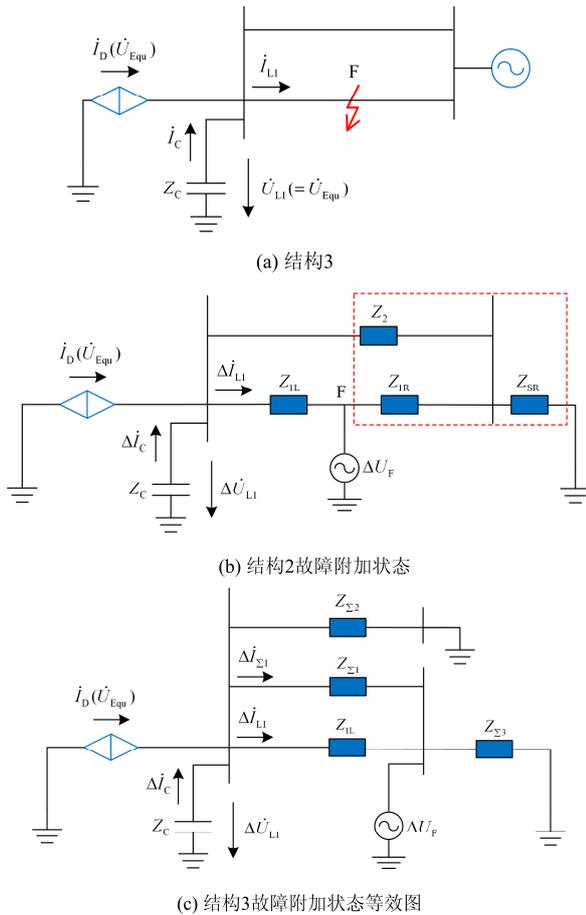


图 6 结构 3 及其故障附加状态

Fig. 6 Structure 3 and its fault additional status

基于图 6(c)可得:

$$\begin{cases} Z_{\Sigma 1} = Z_2 + Z_{1R} + Z_2 Z_{1R} / Z_{SR} \\ Z_{\Sigma 2} = Z_2 + Z_{SR} + Z_2 Z_{SR} / Z_{1R} \\ Z_{\Sigma 3} = Z_{1R} + Z_{SR} + Z_{1R} Z_{SR} / Z_2 \end{cases} \quad (7)$$

显然, $Z_{\Sigma 1}$ 、 $Z_{\Sigma 2}$ 、 $Z_{\Sigma 3}$ 、 Z_{L1} 阻抗角应近似相等, 即 ΔI_{L1} 和 $\Delta I_{\Sigma 1}$ 无相位差。此时, 因 $Z_{\Sigma 2}$ 支路的存在, 对故障线路近逆变站侧保护单元, 结构 3 可等效为结构 2。因此, 方向纵联保护可适应逆变侧结构 3 出线结构。

3 方向纵联保护适应性仿真分析

3.1 PSCAD 仿真模型

如图 7 所示, 基于 ± 800 kV 天中直流系统基本参数^[18-20], 建立了 PSCAD 仿真模型, 其中包括: 24 脉动换流站, 2 190 km 直流输电线路, 三种不同的出线结构。数据采样频率为 4 kHz, 傅里叶变换采取 20 ms 滑动数据窗。

3.2 结构 1 仿真分析

图 8 为逆变侧结构 1 出线时方向纵联保护适应性仿真结果, 其中 θ_L 、 θ_R 分别为近逆变站侧、远逆变站侧故障方向判别角, 可见:

- 1) 对工况 1 和工况 2, 远逆变站侧可正确识别正向故障, 但近逆变站侧均难以正确识别正向故障;
- 2) 对工况 3, 两端保护单元均可正确识别正向故障;
- 3) 仿真结果符合 2.2 节的理论分析。

3.3 结构 2 仿真分析

图 9 为逆变侧结构 2 出线时方向纵联保护适应性仿真结果, 其中 θ_L 、 θ_R 分别为近逆变站侧、远逆变站侧故障方向判别角, 可见:

- 1) 无论工况 1、工况 2 或工况 3, 两端保护单元均可正确识别正向故障;
- 2) 仿真结果符合 2.3 节的理论分析。

3.4 结构 3 仿真分析

图 10 为结构 3 出线时方向纵联保护适应性仿真结果, 其中 θ_L 、 θ_R 分别为近逆变站侧、远逆变站侧故障方向判别角, 可见:

- 1) 无论工况 1、工况 2 或工况 3, 当首次判别出故障方向时, 两端保护单元均可正确识别正向故障;
- 2) 由于双回线(或多回线)故障后暂态功率会发生转移, 应尽量只利用最初判别出的故障方向;
- 3) 仿真结果符合 2.4 节的理论分析。

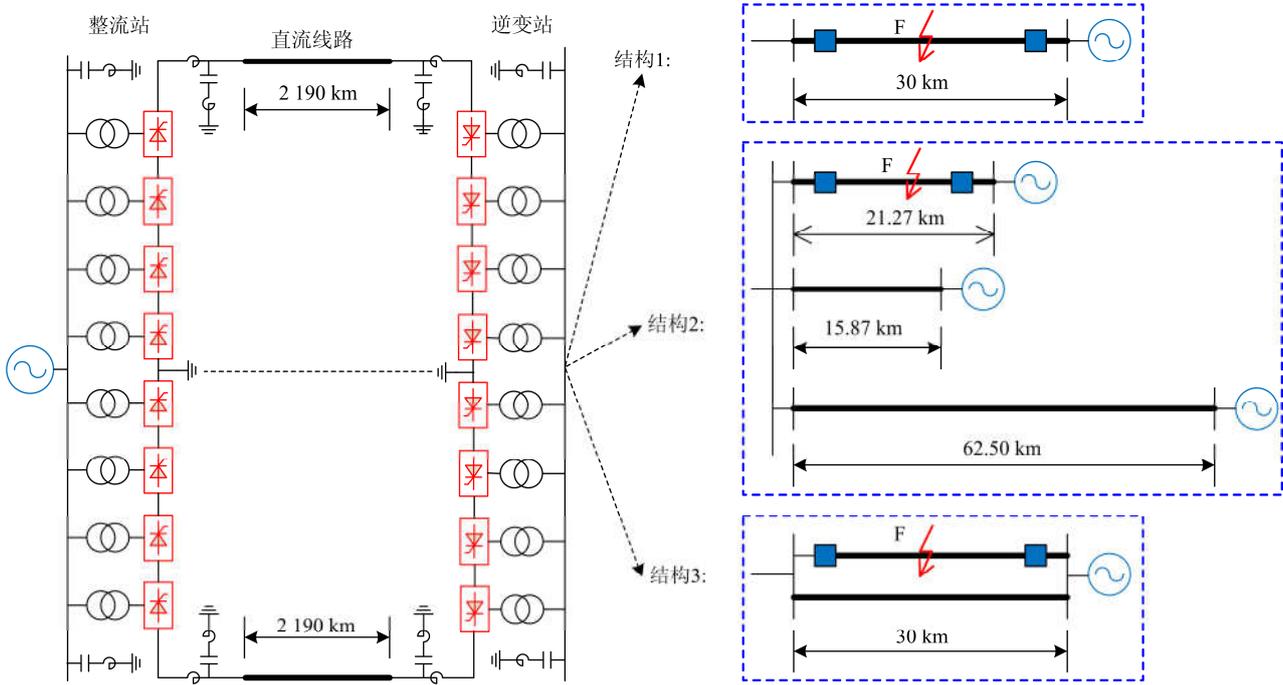
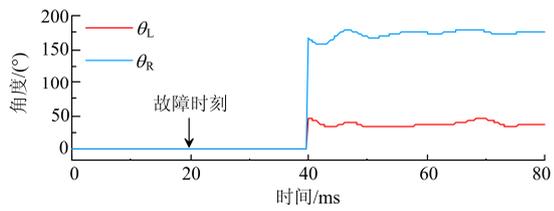
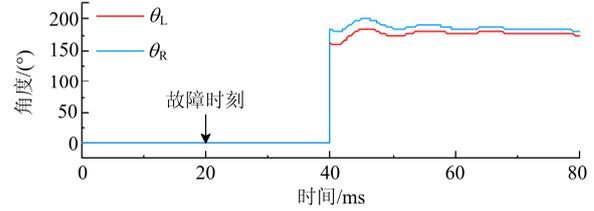


图 7 交直流混联电网 PSCAD 仿真模型

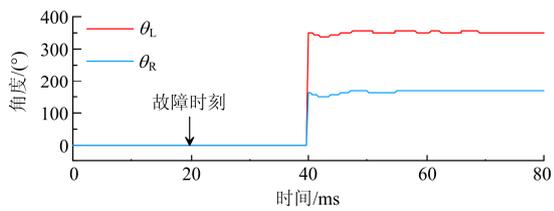
Fig. 7 PSCAD simulation model of AC-DC hybrid power system



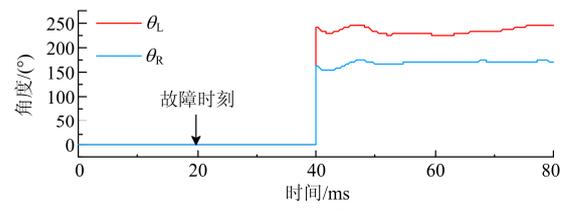
(a) 工况1



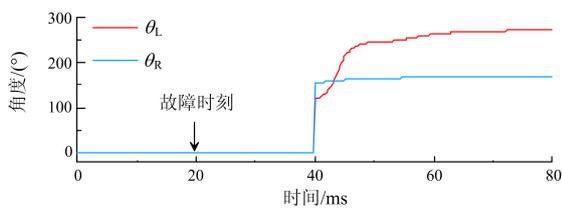
(a) 工况1



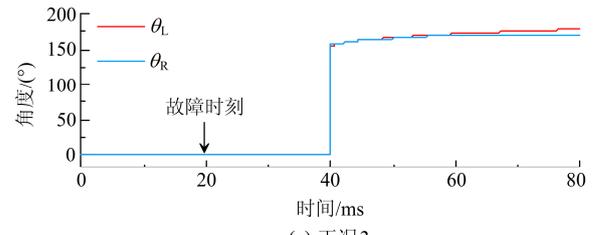
(b) 工况2



(b) 工况2



(c) 工况3



(c) 工况3

图 8 方向纵联保护适应性仿真结果(结构 1)

Fig. 8 Simulation results of adaptability of directional pilot protection (structure 1)

图 9 方向纵联保护适应性仿真结果(结构 2)

Fig. 9 Simulation results of adaptability of directional pilot protection (structure 2)

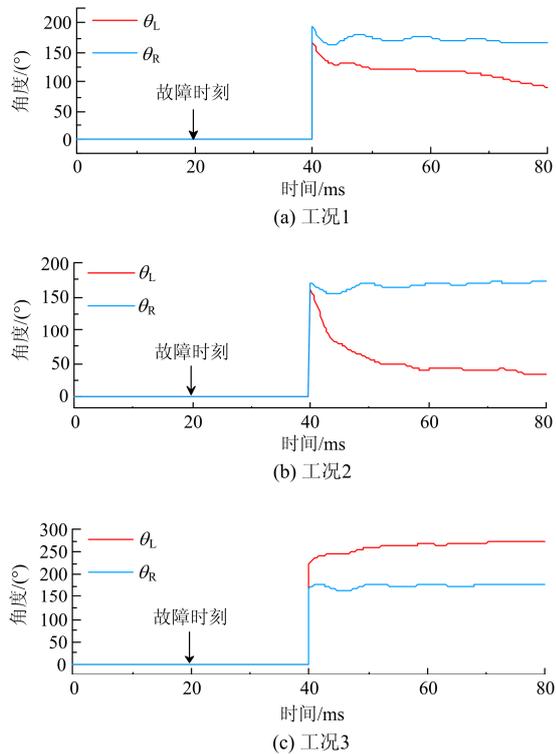


图 10 方向纵联保护适应性仿真结果(结构 3)

Fig. 10 Simulation results of adaptability of directional pilot protection (structure 3)

4 结论

在充分考虑逆变站不同工作状态、逆变站交流侧不同出线结构的基础上, 通过理论分析和仿真验证, 得出以下结论:

- 1) 逆变侧交流出线为单回线单输电走廊结构时, 方向纵联保护不再适用;
- 2) 逆变侧交流出线为单回线多输电走廊结构或双回线(多回线)输电走廊结构时, 方向纵联保护仍可适用;
- 3) 逆变侧交流出线为双回线或多回线输电走廊结构时, 应采用保护单元最初判别出的故障方向, 以避免保护误动。

参考文献

- [1] ZHENG Junchao, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. A novel differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 94: 171-178.
- [2] CHEN G, HAO Miao, XU Zhiqiang. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2015, 1(2): 9-21.
- [3] ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [4] 齐国强, 王增平. 基于 Hilbert-Huang 变换的 HVDC 突变方向纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 92-99.
- QI Guoqiang, WANG Zengping. Directional pilot protection method of fault component for HVDC transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 92-99.
- [5] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
- LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [6] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [7] 赵书强, 董沛毅, 蒲莹, 等. 逆变侧控制策略对换相失败影响的研究[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3840-3848.
- ZHAO Shuqiang, DONG Peiyi, PU Ying, et al. Research on influence of inverter side control strategy on commutation failure[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3840-3848.
- [8] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
- LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [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] ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012,

- 27(3): 1583-1591.
- [11] MEAH K. A new simplified adaptive control scheme for multi-terminal HVDC transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2010, 32(4): 243-253.
- [12] LIU Qiang, CAI Zexiang, HUANG Minghui, et al. Influence of HVDC commutation failure on directional comparison pilot protection of AC system[C] // International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), April 6-9, 2008, Nanjing, China: 1943-1948.
- [13] HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, FEI Bin, et al. Effect of commutation failure on the distance protection and the countermeasures[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(9): 838-844.
- [14] 申洪明. 换相失败对交流侧保护的影响分析与对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 32-38.
SHEN Hongming. Study effect of commutation failure on AC protection and the countermeasure[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 32-38.
- [15] 刘俊磊. 交直流系统故障相互作用分析计算模型及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 68-69.
LIU Junlei. Study on fault interaction analysis and calculation model of AC/DC system and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 68-69.
- [16] 刘俊磊, 王刚, 李海锋, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118.
- [17] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [18] 李钊, 邹贵彬, 许春华, 等. 基于 S 变换的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1228-1235.
LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
- [19] 邢鲁华. 高压直流输电线路保护与故障测距原理研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 56-57.
XING Luhua. Research on protection and fault location principles for HVDC transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2014: 56-57.
- [20] 胡艳梅, 吴俊勇, 李芳, 等. ± 800 kV 哈郑特高压直流控制方式对河南电网电压稳定性影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 147-153.
HU Yanmei, WU Junyong, LI Fang, et al. Impacts of DC system control mode for ± 800 kV Ha-Zheng UHVDC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-06-13

作者简介:

王 栋(1992—), 男, 博士, 研究方向为交直流混联电网新型保护原理、电子式互感器; E-mail: yiyangzi007@163.com

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: houleig@mail.sdu.edu.cn

李文琳(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交直流混联电网新型保护原理. E-mail: liwenlin@mail.sdu.edu.cn

(编辑 姜新丽)